

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Martin Růžička

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Řídicí jednotka pro elektrokola s možností rekuperace

E-bike Control Unit with Regenerating mode

2021

Martin Růžička

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při tvorbě bakalářské práce, dále bych rád poděkoval Ing. Robertu Kučerovi za odbornou pomoc a spolupráci při měření.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem hardware a software pro řídicí jednotku elektrokola. Základními prvky při vývoji hardware jsou vývojové moduly firmy Texas Instruments s DSP TMS320F28069M a knihovny MotorWare. Na základě zkušeností s vývojovými moduly byla vytvořena řídicí jednotka a potřebný software, který řídí moment BLDC motoru elektrokola na základě požadavků uživatele. Dva brzdové senzory umožňují nejen přerušení tahu motoru, ale také dovolují třístupňové brždění, kdy dochází k rekuperaci energie do akumulátoru.

Klíčová slova

BLDC motor, DSP, elektrokolo, bezsenzorové řízení

Abstract

This bachelor thesis deals with the design of hardware and software for an e-bike control unit. The basic elements in hardware development are Texas Instruments development modules with DSP TMS320F28069M and MotorWare libraries. Based on experience with development modules, a control unit and the necessary software was created, which controls the BLDC torque of the e-bike motor based on user requirements. Two brake sensors not only allow torque of the engine to be interrupted, but also allow three-stage braking, where energy is recovered into the battery.

Key words

BLDC motor, DSP, e-bike, sensorless control

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 8 |
| 1 Rozbor současného stavu pohonných jednotek elektrokola..... | 9 |
| 2 Realizace řídicí jednotky pro pohon elektrokola s možností rekuperace energie při brzdění..... | 13 |
| 2.1 Využití vývojových desek..... | 13 |
| 2.2 Konstrukce prototypové desky..... | 15 |
| 2.3 Senzory..... | 16 |
| 2.4 Finální verze desky | 17 |
| 2.4.1 Zdrojová část | 17 |
| 2.4.2 Blok spínačů | 18 |
| 2.4.3 Obvod řízení výkonových spínačů | 19 |
| 2.4.4 Signálový procesor | 20 |
| 2.4.5 Vstupy senzorů, výstup na displej | 21 |
| 2.5 Návrh plošného spoje..... | 22 |
| 2.6 Mechanická konstrukce..... | 24 |
| 3 Implementace algoritmu řízení momentu pohonu elektrokola..... | 25 |
| 3.1 Analogové vstupy..... | 26 |
| 3.2 Parametry motoru a rozsah měření napětí a proudů..... | 27 |
| 3.3 Vstupy/výstupy | 28 |
| 3.4 Přerušení..... | 29 |
| 4 Zhodnocení parametrů realizovaného vzorku a jeho porovnání s původním řešením | 30 |
| 4.1 Měření na zkonstruované řídicí jednotce | 30 |
| 4.2 Měření při rekuperaci | 35 |
| 4.3 Měření na původní řídicí jednotce | 36 |
| 5 Závěr | 37 |
| Použitá literatura | 38 |
| Seznam příloh..... | 40 |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Význam anglicky | Význam česky |
|-------------|-------------------------------|---------------------------------|
| ADC | Analog to Digital Converter | Analogově-digitální převodník |
| BLDC | Brush Less Direct Control | Bezkartáčový stejnosměrný motor |
| EMC | Electromagnetic compatibility | Elektromagnetická kompatibilita |
| FET | Field Effect Transistor | Tranzistor řízený polem |
| HAL | Hardware Application Layer | Vrstva ovladačů periférií |
| DSP | Digital Signal Processor | Procesor pro zpracování signálů |
| PWM | Pulse Width Modulation | Pulzně šířková modulace |
| OZ | Operational amplifier | Operační zesilovač |
| LDO | Low drop-out | Nízký úbytek (napětí) |
| ESL | Equivalent series inductance | Ekvivalentní sériová indukčnost |
| ESR | Equivalent series resistance | Ekvivalentní sériový odpor |
| SPI | Serial Peripheral Interface | Sériová sběrnice |
| HW | Hardware | Hardware |
| SW | Software | Software |

| Symbol | Význam |
|--------------------------|---------------------------------|
| U_d | napájecí napětí |
| M_n | točivý moment motoru |
| R_{SHUNT} | odpor bočníku pro měření proudu |
| V_{MAX} | maximální měřitelné napětí |
| I_{MAX} | maximální měřitelný proud |
| V_{ADC} | napětí AD převodníku |
| V_{REF} | referenční napětí |
| A | napětíové zesílení OZ |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 – lichoběžníkové řízení u řadiče DRV8306 [6] | 9 |
| Obrázek 2 – příklad provedení předního motoru s HAL senzory | 10 |
| Obrázek 3 – BLDC v zadní části kola, bez osazené převodovky | 11 |
| Obrázek 4 – příklad středového provedení motoru elektrokola | 11 |
| Obrázek 5 – řídicí jednotka KU63..... | 12 |
| Obrázek 6 – zapojení výkonové části jednotky KU63 [20]..... | 12 |
| Obrázek 7 – blokové schéma regulace pohonu s InstaSPIN-Motion [7]..... | 14 |
| Obrázek 8 – propojení EVM DRV8305 a TMS320F28069M (spodní)..... | 15 |
| Obrázek 9 – prototyp řídicí desky a její propojení s výkonovou částí a deskou senzorů..... | 15 |
| Obrázek 10 – senzor řízení momentu..... | 16 |
| Obrázek 11 – brzdový senzor | 16 |
| Obrázek 12 – blokové schéma zapojení řídicí jednotky..... | 17 |
| Obrázek 13 – blokové zapojení zdrojové části..... | 18 |
| Obrázek 14 – zapojení jedné fáze výkonové části [21] | 18 |
| Obrázek 15 – provedení pouzdra spínače, vpravo pohled shora [21] | 18 |
| Obrázek 16 – funkční zapojení DRV8305 [11]..... | 19 |
| Obrázek 17 – vnitřní blokové zapojení použitého DSP [10]..... | 20 |
| Obrázek 18 – zapojení senzorů, LED a výstup sériové linky na displej nebo logger dat..... | 21 |
| Obrázek 19 – kalkulace šířky spoje [18] | 22 |
| Obrázek 20 – nastavení zón silnoprůdých vedení | 22 |
| Obrázek 21 – foto realizované desky řízení pohonu | 23 |
| Obrázek 22 – původní řídicí jednotka (vlevo) a krabice s popisovaným pohonem bez víka .. | 23 |
| Obrázek 23 – kóty děr pro uchycení plošného spoje..... | 24 |
| Obrázek 24 – řídicí signály PWM pro jednu fázi, stav stojícího motoru | 30 |
| Obrázek 25 – napětí na motoru fáze A..... | 31 |
| Obrázek 26 – proud na fázi A motoru při zátěži | 31 |
| Obrázek 27 – měření při rozběhu motoru, napětí a proud na vstupech ADC | 32 |
| Obrázek 28 – průběhy během kladného proudu na bočníku spodního spínače..... | 33 |
| Obrázek 29 – průběhy během záporného proudu na bočníku spodního spínače..... | 33 |
| Obrázek 30 – průběhy při zátěži motoru, napětí a proud na vstupech ADC | 34 |
| Obrázek 31 – rozběh z nulových otáček do zátěže..... | 34 |
| Obrázek 32 – průběh napětí a proudu při rekuperaci | 35 |
| Obrázek 33 – průběhy na senzoru HAL a odpovídající fázi motoru původní jednotky | 36 |
| Obrázek 34 – průběhy při maximálních otáčkách u původní jednotky | 36 |

Úvod

V současné době jsou na elektrické zařízení kladeny vysoké nároky z pohledu spolehlivosti, údržby a životního prostředí. BLDC motor je z pohledu údržby nenáročný, protože se jedná o bezkartáčový motor. Mezi důležité faktory BLDC motoru patří vysoká účinnost, vysoký točivý moment v poměru k velikosti, nízká hmotnost a v neposlední řadě tichý provoz.

V dnešní době se můžeme setkat s BLDC motory v mnoha aplikacích. V současné době je na ústupu použití v CD/DVD mechanikách a počítačových discích. Nejčastěji se můžeme setkat s aplikací BLDC motoru v elektrokolech, elektrokoloběžkách, elektromobilech nebo také ve ventilátorech.

BLDC je zkrácený pojem pro stejnosměrný motor s elektronickou komutací, z anglického označení BrushLess DC Motor. Tento motor se liší oproti komutátorovému tím, že funguje obráceně. U klasického komutátorového motoru je stator osazen permanentními magnety nebo cívkou tvořící elektromagnet a rotuje vinutí napájené přes kartáče a komutátor. BLDC motor má pevné vinutí několika fází na statoru a rotor je obvykle osazen permanentními magnety. Komutace je u BLDC motoru prováděna elektronicky.

1 Rozbor současného stavu pohonných jednotek elektrokol

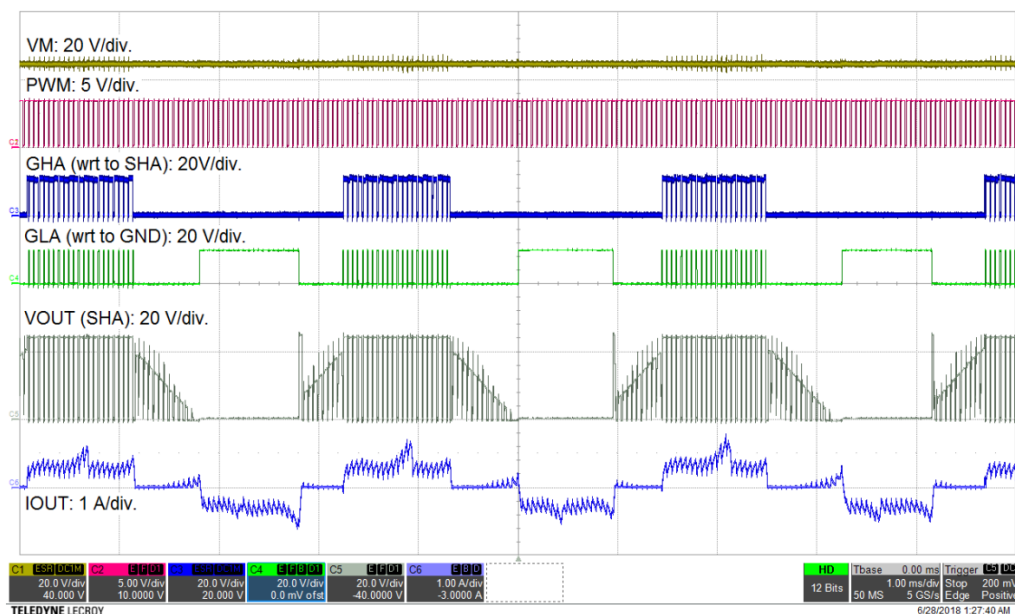
Pohonné jednotky elektrokol se skládají z akumulátoru, řídicí jednotky a BLDC motoru. Řídicí jednotka elektrokola musí dodávat výkon v rozsahu od nuly do jmenovitého maximálního výkonu motoru při otáčkách odpovídajících rychlosti jízdního kola od nuly do maximální rychlosti asi 45 km/h. U stejnosměrných motorů lze řídit tuto energii pomocí PWM. Vzhledem k omezené životnosti a poruchovosti kartáčů u DC motorů se v dnešní době již převážně vyskytují bezkartáčové BLDC motory (z anglického Brush-Less Direct Current).

BLDC motor je typ synchronního motoru, kde magnetická pole generovaná statorem i rotorem mají stejnou frekvenci. Tento motor má vyšší životnost, protože nepoužívá kartáče. Má vysoký točivý moment již od nulových otáček, velké otáčky bez zátěže a malé energetické ztráty.

Současné řídicí jednotky využívají HAL senzorů, integrovaných v BLDC motoru, které řídí spínání jednotlivých fází motoru. V dnešní době jsou vyráběny řadiče FET, které jsou přímo určeny pro jednoduché pohony BLDC a mají integrovány logiku, která vyhodnocuje spínání díky zpětné vazbě pozice rotoru z HAL senzorů. Tyto jednotky mohou využívat

- Lichoběžníkové řízení
- Sinusové řízení

Nejčastěji se u běžných řídicích jednotek elektrokol využívá lichoběžníkové řízení. Typický příklad průběhů napětí (VOUT) a proudu (IOUT) na motoru je na obrázku 1. Lichoběžníkové řízení však generuje vyšší elektromagnetické rušení (EMI), především v nízkých otáčkách.



Obrázek 1 – lichoběžníkové řízení u řadiče DRV8306 [6]

Sinusové řízení aproximuje pomocí PWM sinusový průběh proudu ve vinutích a umožňuje dobrý točivý moment při nízkých rychlostech. Vyžaduje však velmi přesnou zpětnou vazbu a vhodnější je tak HAL senzor s analogovým výstupem, kde při otáčení motoru máme na výstupu HAL senzoru sinusový průběh signálu a můžeme tak lépe detekovat polohu. U vyšších rychlostí je právě tato přesnost velmi důležitá a náročná na výpočetní výkon řídicího procesoru. To je jedním z důvodů, proč není tento typ řízení v současné době více rozšířený, především u levných řídicích jednotek elektrokol.

Vzhledem k možnostem zástavby pohonu pro elektrokolo, existují 3 varianty konstrukcí:

- Přední
- Zadní
- Středová

Umístění pohonu do předního kola je mnohem jednodušší pro zástavbu do elektrokola ve srovnání s umístěním do zadního kola. Přední pohon je oddělený od ostatních částí kola a údržba těchto částí je tak nezávislá a neovlivňuje pohonnou část. Vzhledem k těžišti kola je u předního umístění motoru větší možnost prokluzu kola během záběru motoru při zvýšení momentu.



Obrázek 2 – příklad provedení předního motoru s HAL senzory

Při umístění pohonu do zadního kola je mnohem menší šance prokluzu kola díky těžišti vlivem sedícího cyklisty. Vzhled elektrokola je také velmi podobný klasickému kolu a mnoho zájemců o elektrokolo jim tak dává přednost. Servis a výměna motoru u zadního kola je však nejtěžší. Zadní motorová elektrokola vysokých výkonů také obvykle postrádají možnost kotoučových brzd.



Obrázek 3 – BLDC v zadní části kola, bez osazené převodovky

Motor umístěný ve středu kola pohání ozubené kolo a využívá tak řetězového převodu. Vzhledem k tomu, že přenos momentu motoru využívá řazení, je tento typ náročnější na opatrné řazení, což jej dělá nepříjemným při stoupání do kopců. Díky připojení motoru na řetězový převod může docházet k častějším servisním zásahům na dílech převodů u vyšších výkonů motoru. Přesto je tato technologie v současnosti nejoblíbenější. Důvodem je skutečnost, že díky převodu lze i menší moment motoru díky převodu do pomalých otáček zvýšit a vystačit si tak s motorem s menším výkonem. Vhodným řazením převodů lze také šetřit energii akumulátoru a zvýšit tak dojezd.



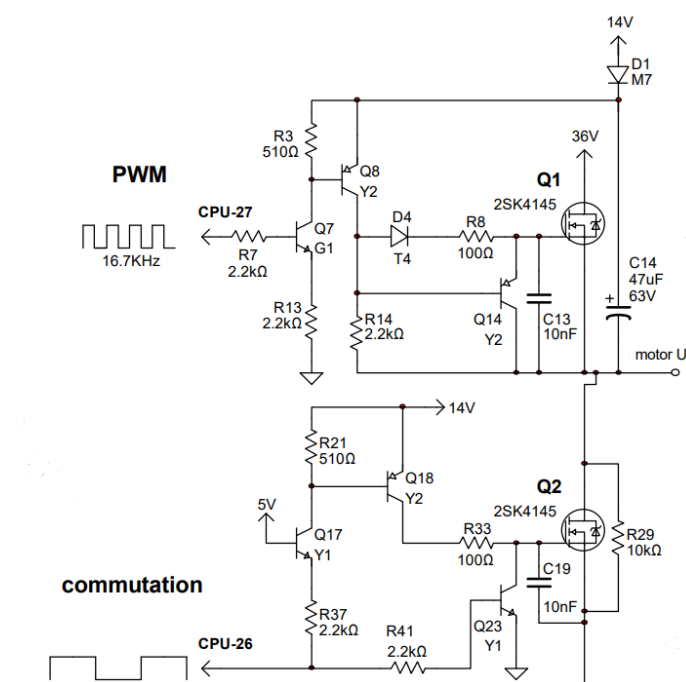
Obrázek 4 – příklad středového provedení motoru elektrokola

Běžně vyráběné řídicí jednotky jsou především z důvodu jednoduchosti řešeny se senzory HAL. Toto řešení nevyžaduje nákladné řízení pomocí DSP a bývá tak mnohem levnější. Z hlediska rozjezdu motoru je u nízkých otáček zřetelné cukání a zvukové projevy motoru, je proto vhodné aktivovat pohon až při určité minimální rychlosti. Měřením těchto jednotek je také zřejmé, že regulace pomocí PWM se děje pouze v horní větvi, spodní větev můstku je v aktivní části trvale sepnuta. To je rozdílné chování ve srovnání s obrázkem 1.

Výrobci schémata obvykle neuvádějí, nicméně lze nalézt občas informace, kde byly jednotky podrobeny reverznímu výzkumu. Jako příklad může sloužit zapojení výkonové části jednotky KU63, 250 W z obrázku 5, které je na obrázku 6 [20]. Zapojení srovnávané jednotky z obrázku 22 bohužel není dostupné, dá se však podle měření na výstupech, uvedených níže, odvodit podobnost řízení.



Obrázek 5 – řídicí jednotka KU63



Obrázek 6 – zapojení výkonové části jednotky KU63 [20]

Z obrázku 6 je zřejmé, že jednotka využívá zvyšování napětí pro spínání hradla horního spínače pomocí boost diody D1 a kondenzátoru C14. Toto řešení vyžaduje pravidelné spínání můstku, aby bylo dosaženo vyššího napětí na katodě D1 a tím bylo možné sepnout tranzistor Q1. Běžně musí být spínací napětí o 10 V vyšší, než je napětí baterie.

2 Realizace řídicí jednotky pro pohon elektrokola s možností rekuperace energie při brzdění

Řídicí jednotka je navržena pro pohon BLDC motoru, který je dostupný ve většině obchodů s vybavením pro elektrokola. Jedná se o motor s vnějším rotorem, přizpůsobeným pro vpletení dovnitř ráfku. Výrobce udává tyto parametry:

Tabulka 1 – parametry BLDC motoru

| | | |
|-----------------------------|------|------|
| Napájecí napětí U_d [V] | 36 | 48 |
| Výkon P [W] | 500 | 750 |
| Točivý moment M_n [Nm] | 18,2 | 27,3 |
| Počet pólů rotoru N_r [-] | 46 | |
| Hmotnost m [kg] | 6,4 | |

Z tabulky 1 vyplývá, že motor lze provozovat až do 48 V. Vzhledem k větší dostupnosti komponent pro napětí do 45 V bylo zvoleno pracovní napětí 36 V. Limitujícím faktorem maximálního napětí je především výběr řídicího obvodu výkonových spínačů, kde nejbližší vyšší hladina napětí je 80 V. Dalším parametrem potřebným pro návrh řídicí jednotky je maximální pracovní proud motoru. Jako výchozí parametr použijeme výkon motoru:

$$I = \frac{P}{U_d} = \frac{500}{36} = 13,9 \text{ A} \quad (1)$$

Vypočítaný proud je efektivní, pro maximální provozní proud budeme uvažovat proud $I_{MAX} = 20 \text{ A}$.

2.1 Využití vývojových desek

Pro první testy využijeme hotových modulů od firmy Texas Instruments (TI), které jsou cenově přijatelné a urychlí vývoj. Po porovnání všech alternativ na webových stránkách firmy TI byl zvolen modul se signálovým procesorem TMS320F28069M [7], který má ve vyhrazené paměti ROM uloženy knihovny pro řízení motorů, výrobcem označované jako InstaSPIN-Motion (obrázek 7). Jejich součástí je modul FOC (Field Oriented Control) a modul FAST (Flux, Angle, Speed, Torque), který zajišťuje náhradu senzorů a umožňuje bez-senzorové řízení. FAST estimátor umožňuje detekci parametrů motoru, změření odporu vinutí a identifikaci motoru. Tyto činnosti však vyžadují určitý čas po spuštění, proto je zde možnost tyto hodnoty uložit a při dalším startu pouze načíst. FAST provádí zjištění pozice rotoru a rychlosti otáčení z napětí jednotlivých fází motoru a také jejich proudů.

ADC uvnitř DSP má referenční napětí 3,3 V. Veškeré veličiny je tak zapotřebí převést na rozsah 0 – 3,3 V. V případě napětí budeme pracovat pouze v kladné oblasti. Jako výkonový modul pro BLDC byl zvolen BOOSTXL-DRV8305EVM [8], což je vývojová deska s řadičem DRV8305 od firmy TI. Tento modul již obsahuje také potřebné napěťové děliče, bočníky v každé fázi pro měření proudů.

Vybrané vývojové desky byly zvoleny s ohledem na skutečnost, že na webových stránkách firmy TI je pro uvedený typ DSP k dispozici soubor s knihovnami MotorWare [15] a s demo příklady.

Vzhledem k tomu, že obvod DRV8305 obsahuje také tři operační zesilovače pro zpracování signálu z bočníků, nejsou potřeba další obvody. DRV8305 umožňuje programovatelný zisk (10, 20, 40 a 80 V/V) a také vytvoří potřebný offset pro měření proudu v záporné oblasti. V případě modulu je použitý bočník 0,007 Ω . Výpočet pro zjištění potřebného nastavení zisku v registrech obvodu.

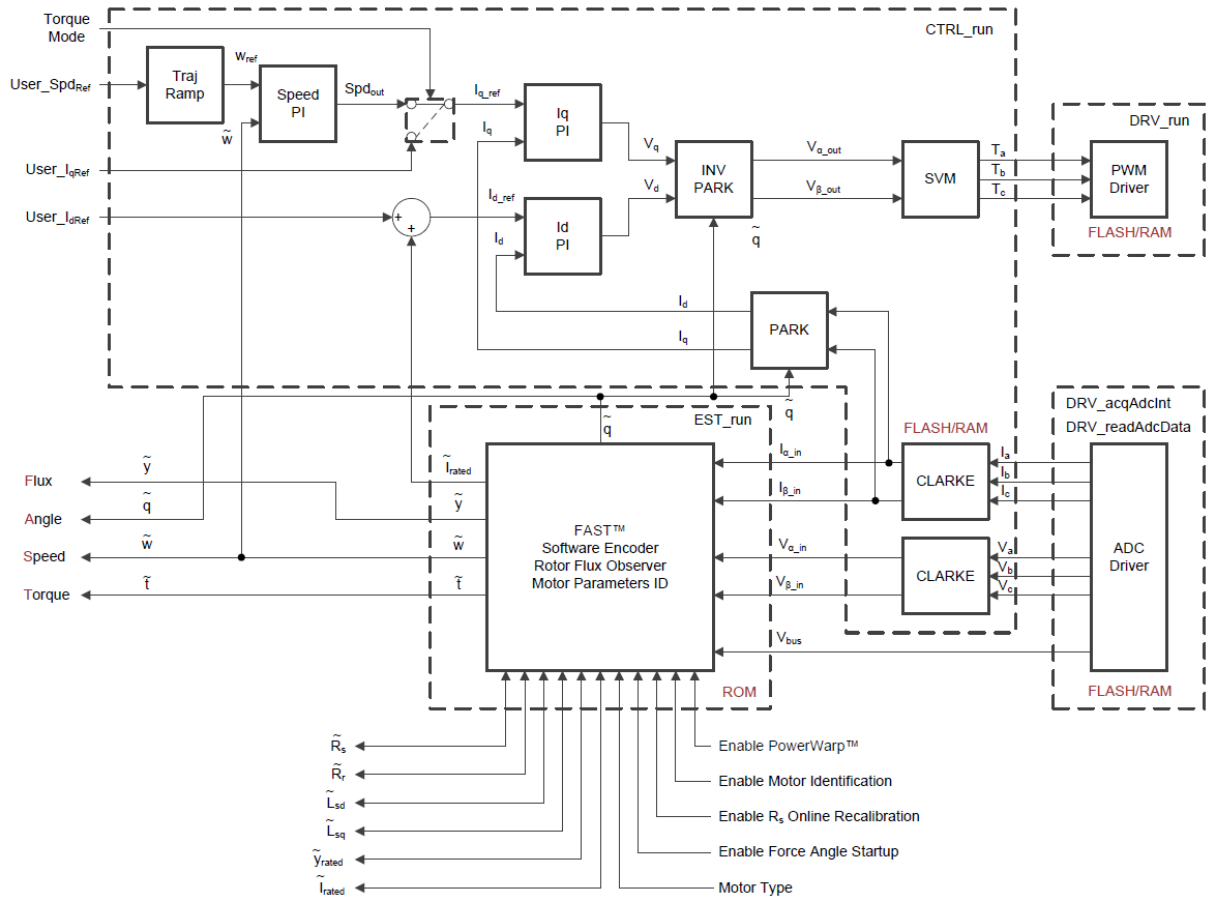
$$A = \frac{U_{REF}}{2 \cdot I_{MAX} \cdot R_{SHUNT}} = \frac{3,3}{2 \cdot 20 \cdot 0,007} = 11,786 \quad (2)$$

Na základě výpočtu byl zvolen zisk $A = 10$.

Dále je zapotřebí výpočet rozsahu měření napětí. Pro výpočet byly použity aktuální hodnoty děličů na modulu BOOSTXL-DRV8305EVM.

$$U_{MAX} = U_{ADC} \cdot \frac{(4,99 \text{ k}\Omega + 62 \text{ k}\Omega)}{4,99 \text{ k}\Omega} = 3,3 \cdot \frac{(4,99 \text{ k}\Omega + 62 \text{ k}\Omega)}{4,99 \text{ k}\Omega} = 44,3 \text{ V} \quad (3)$$

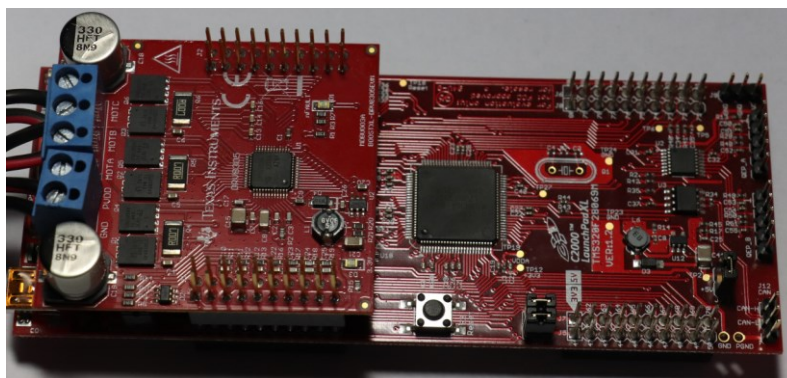
Z uvedených výpočtů vyplývá, že použitý modul vyhoví pro proudy do 20 A a napětí baterií do 44 V.



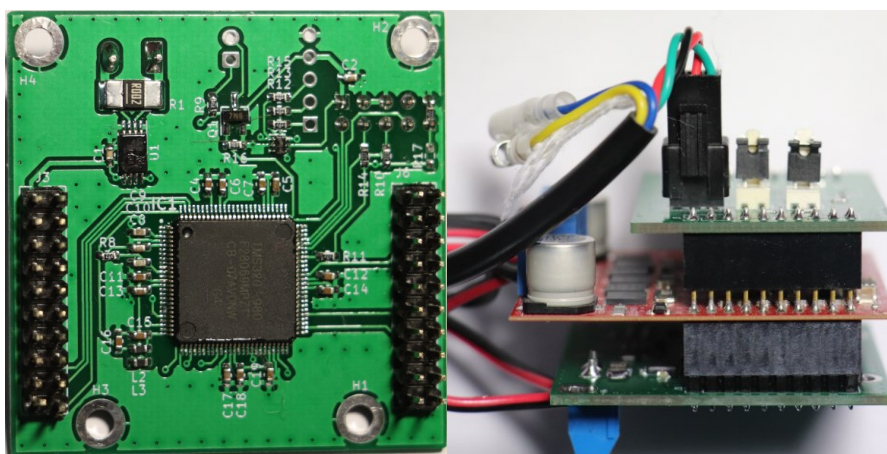
Obrázek 7 – blokové schéma regulace pohonu s InstaSPIN-Motion [7]

2.2 Konstrukce prototypové desky

Po ověření na těchto připravených deskách následoval návrh prototypu vlastní řídicí desky a propojovací desky senzorů. Na obrázku 8 je zobrazeno propojení dvou vývojových desek. Deska řízení umožňuje připojení až 2 motorů. Vlastní deska řízení vychází obvodově ze zapojení vývojové desky s vynecháním obvodů pro druhý motor a také debuggeru XDS100v2. K programování a ladění aplikace je na vlastní desce standardně zapojený JTAG konektor a potřebné signály jsou přivedeny z vývojové desky.



Obrázek 8 – propojení EVM DRV8305 a TMS320F28069M (spodní)



Obrázek 9 – prototyp řídicí desky a její propojení s výkonovou částí a deskou senzorů

Návrh schématu a plošného spoje byl proveden v programu KiCAD. Deska řízení byla navíc doplněna o bočník a diferenciální zesilovač pro měření nejen celkového odebíraného proudu z akumulátoru, ale také pro měření nabíjecího proudu. Použitý diferenciální zesilovač INA240A1 má zisk $A = 20 \text{ V/V}$. Pro měření v kladné i záporné části byl zvolen bočník $0,002 \Omega$. Výpočtem lze ověřit, že maximální měřitelný proud je $\pm 41,25 \text{ A}$.

$$I_{MAX} = \frac{U_{REF}}{2 \cdot A \cdot R_{SHUNT}} = \frac{3,3}{2 \cdot 20 \cdot 0,002} = 41,25 \text{ A} \quad (4)$$

2.3 Senzory

Jako senzor pro nastavení momentu byl použit dostupný komplet, obsahující displej a HAL s lineárním výstupem. Na displeji je měřeno napětí baterií. Komplet se montuje na řídítka. Použitý spínač s klíčem slouží k zapnutí řídicí elektroniky, nelze jej použít ke spínání baterie k výkonové části.



Obrázek 10 – senzor řízení momentu

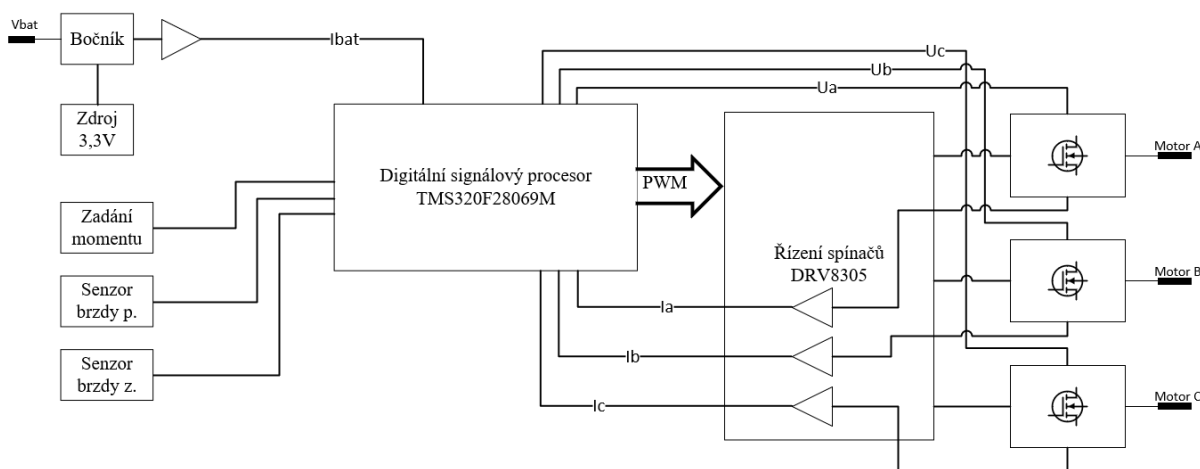
K tomu, aby bylo možné blokovat pohon nebo využít rekuperaci při stisku brzdy, byly pořízeny brzdové HAL senzory, které se montují na lanko, takže není třeba upravovat brzdové páčky v případě, že jsou součástí volby převodu. Použití dvou senzorů je zapotřebí pro přední a zadní brzdou zvlášť. Toto řešení zároveň umožňuje použít 3 stupně brždění motorem, kdy v SW nastavíme záporný moment tak, že přední brzda brzdí méně než zadní a při současném stisku obou se momenty sečtou. Senzor využívá HAL senzor s dvojitavovým výstupem, nelze tedy lineárně volit brzdící moment. Senzor je zobrazen na obrázku 11.



Obrázek 11 – brzdový senzor

2.4 Finální verze desky

Po ověření funkčnosti měniče pro elektrokolo a vyřešení nutných úprav bylo celé zapojení řízení navrženo jako jednodeskové. Některé obvody byly převzaty z vývojových desek. Na obrázku 12 je blokové schéma zapojení této desky. Výkonové spínače, které jsou osazeny na vývojové desce, byly nahrazeny variantou polovičního můstku v jednom pouzdře. Tento spínač má totiž dvě chladicí plochy. Jedna je připojena na desku a slouží zároveň jako přívod napětí, druhá chladicí plocha má zemní potenciál a lze ji využít k dodatečnému odvodu tepla. Vzhledem k zapojení bočníků v zemní části je zapotřebí na tuto plochu použít teplotně vodivé, ale elektricky izolační podložky. Vzhledem k velkým spínaným proudům bylo nutné pro tuto desku zvolit tloušťku spojů $70\text{ }\mu\text{m}$. Spoje s větší tloušťkou mědi se již běžně nevyrábí v potřebné konstrukční třídě, aby bylo možné na ní umístit pouzdro DSP s roztečí pinů $0,5\text{ mm}$.

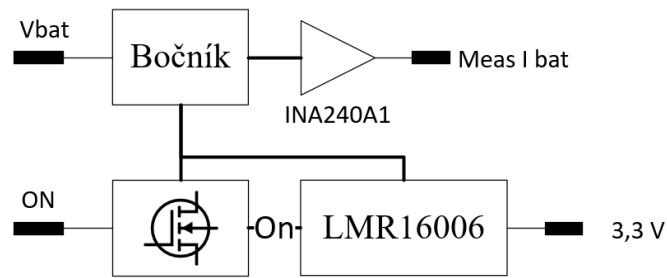


Obrázek 12 – blokové schéma zapojení řídicí jednotky

2.4.1 Zdrojová část

Na obrázku 13 je blokové zapojení zdrojové části. Napětí z akumulátoru (V_{bat}) je připojeno na bočník pro měření celkového proudu odebíraného, případně dodávaného do akumulátoru. Úbytek napětí na bočníku je zesílen pomocí diferenciálního zesilovače INA240A1 a poté je přiveden na vstup ADC v DSP (výstup Meas I bat).

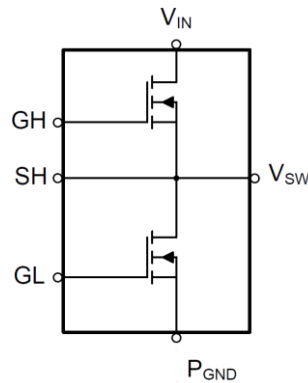
Z bočníku je napájen spínaný zdroj pro napájení DSP řídicí části a také výkonové spínače měniče motoru. Je zde také možno připojit externí spínač (ON), který povolí činnost spínacího zdroje a tím zapne napájení řídicí jednotky. Na plošném spoji se také nachází pájecí propojka, kterou lze přemostit funkci spínání a zajistit tak trvalé napájení jednotky. Toto řešení bylo zvoleno s ohledem na skutečnost, že některé typy akumulátorů mají již integrován vypínač a další vypínač tak není nutný.



Obrázek 13 – blokové zapojení zdrojové části

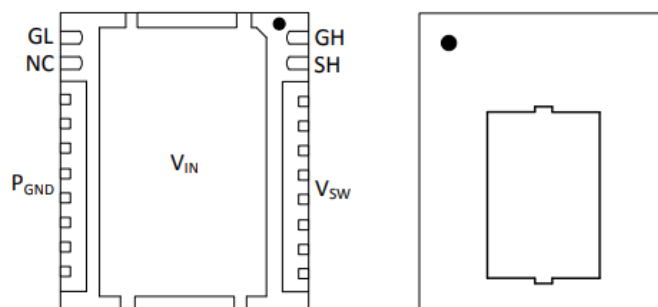
2.4.2 Blok spínačů

Na obrázku 14 je vnitřní zapojení spínače výkonové části. Jedná se o dvojité FET CSD88599, který má provozní napětí $U_{DS} = 54 \text{ V}$ a $I_{DS} = 40 \text{ A}$. Pin V_{sw} je výstup silové části a je připojen na fázi motoru. Řídící elektrody GH a GL jsou přímo připojeny na obvod řízení budiče DRV8305, popisovaném níže. SH je snímací vedení a připojuje se opět k obvodu DRV8305. Pin P_{GND} je připojen přes bočník měření proudu na výkonovou zem. Pin V_{IN} je připojen na bočník měření proudu ve zdrojové části.



Obrázek 14 – zapojení jedné fáze výkonové části [21]

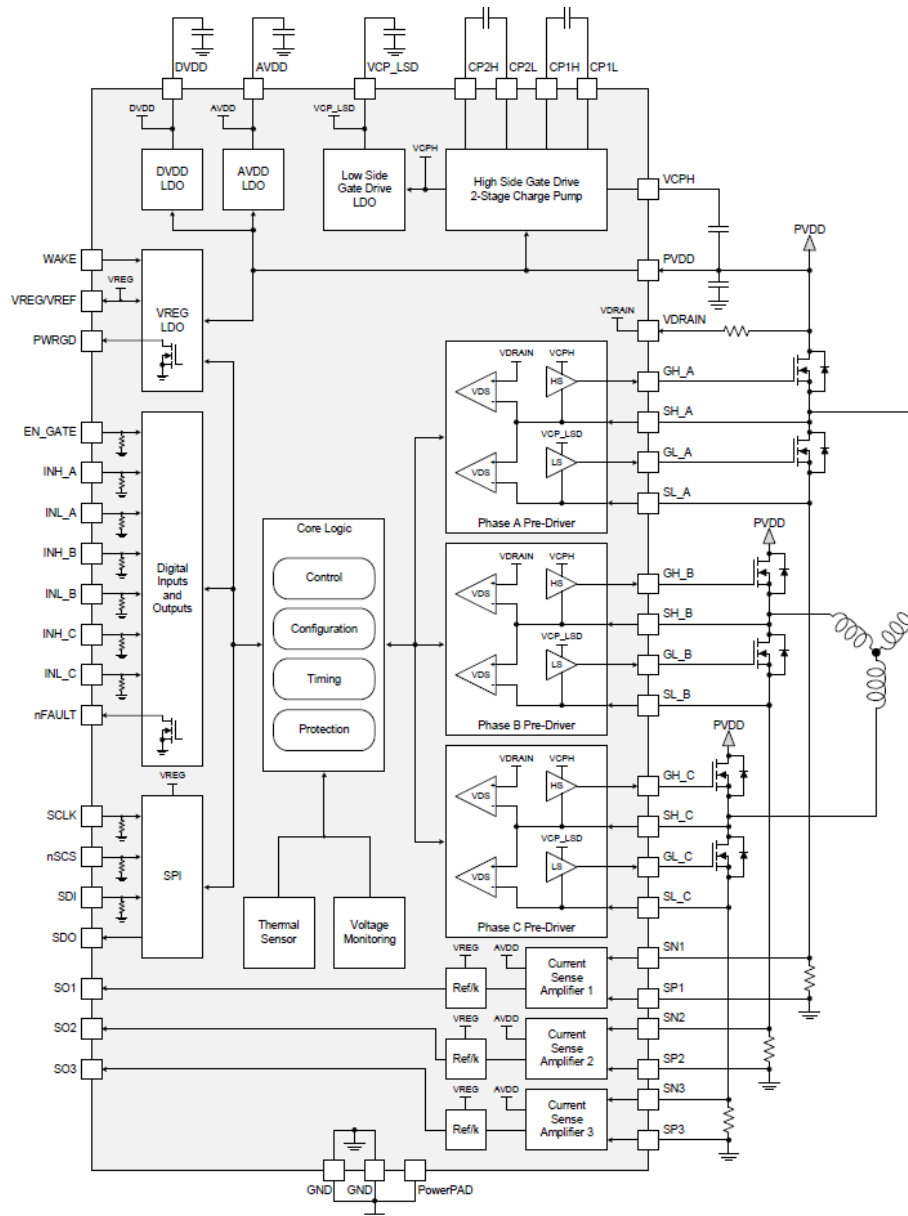
Jak již bylo uvedeno, pouzdro tohoto spínače má dvě chladicí plochy. Tyto plochy však nemají stejný potenciál. Spodní je přes bočník připojena na V_{BAT} a horní na P_{GND} . Provedení pouzdra je na obrázku 15.



Obrázek 15 – provedení pouzdra spínače, vpravo pohled shora [21]

2.4.3 Obvod řízení výkonových spínačů

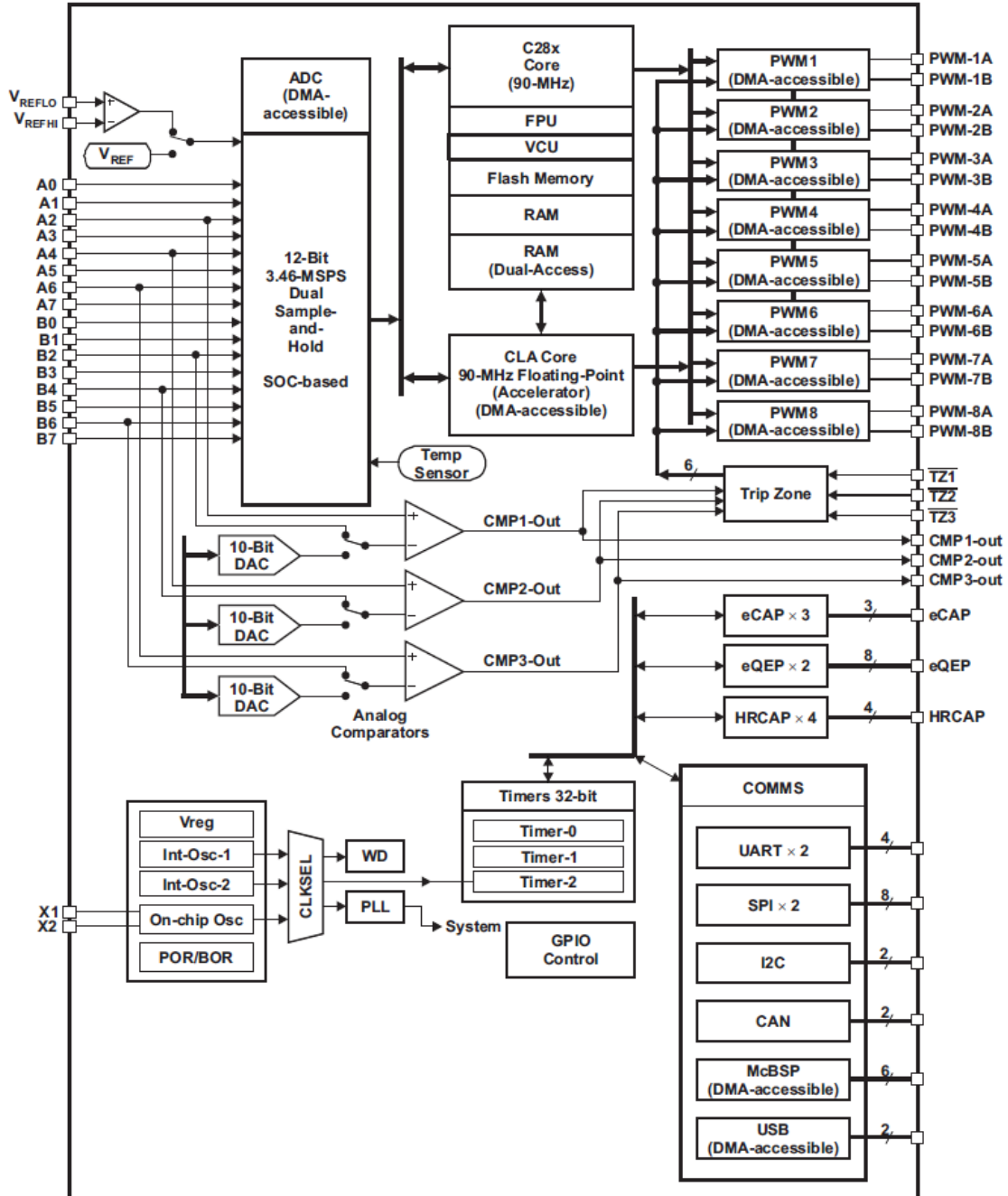
Jádrom řízení spínačů je obvod DRV8305. Jeho funkční zapojení je na obrázku 16. Signály vpravo jsou připojeny na výkonovou část, signály vlevo jdou k DSP. Procesor komunikuje a nastavuje parametry tohoto řadiče pomocí sběrnice SPI. Signály pro řízení spínačů generuje v procesoru speciální blok PWM, každý výkonový spínač je připojen na samostatný signál. Výhodou je možnost nastavení bezpečnostních časů přímo v registrech obvodu tak, aby byla zajištěna prodleva ve spínání tranzistorů v můstku. Chybový signál je veden také do DSP. Obvod obsahuje nábojovou pumpu zajišťující zvýšení napětí pro spínání horních tranzistorů v můstku. Spínací napětí je zhruba o 10 V vyšší než napájecí napětí.



Obrázek 16 – funkční zapojení DRV8305 [11]

2.4.4 Signálový procesor

Jádrem řídicího systému je digitální signálový procesor TMS320F28069M, jehož vnitřní blokové schéma je na obrázku 17. Jedná se o procesor, který má v paměti ROM navíc umístěny knihovny pro řízení motoru a detekci polohy (to označuje koncové písmeno M v názvu).



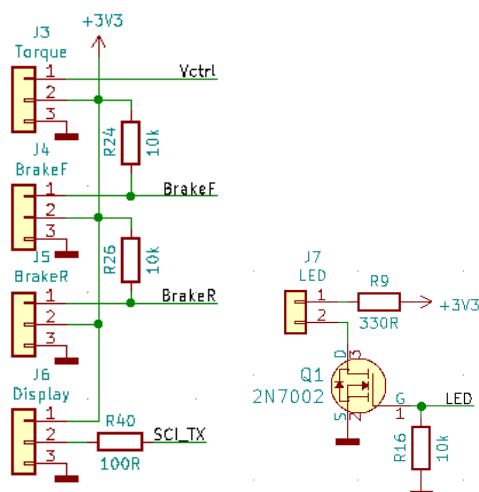
Obrázek 17 – vnitřní blokové zapojení použitého DSP [10]

Řídicí jednotka využívá ze všech periférií především ADC, PWM, SPI a GPIO. Je přidána i možnost použít UART pro přenos měřených údajů během vývoje SW, případně pro připojený displej. DSP má možnost využít interní regulátory napětí pro jádro procesoru, což výrazně zjednodušuje obvodové zapojení a na navrhované desce je toho také využito. Zapojení procesoru vychází z doporučeného zapojení výrobce a obvodového zapojení vývojové desky [7].

Obvodové zapojení je také rozšířeno o možnost připojení HAL senzorů polohy z důvodu možnosti srovnání a testů řízení s pomocí HAL a bezsenzorového řízení s FAST detekcí polohy.

2.4.5 Vstupy senzorů, výstup na displej

Poslední část zapojení desky jsou vstupy od senzorů a možnost připojení displeje, u kterého se předpokládá zpracování dat ze sériové linky místním procesorem. Vzhledem k tomu, že dodávané brzdové senzory jsou dvoustavové a mohou být s jazýčkovým (reed) kontaktem nebo HAL s otevřeným kolektorem, je zde použit pull-up rezistor. Obvod spínače může řídit signalizační LED, lze jej také použít jako alternativní spínač dobíjení akumulátoru při rekuperaci. Záleží na úpravě SW.



Obrázek 18 – zapojení senzorů, LED a výstup sériové linky na displej nebo logger dat

2.5 Návrh plošného spoje

Vzhledem k tomu, že se na jedné desce vyskytuje řídicí i výkonová část, je zapotřebí brát ohled na možné rušení. Dalším nutným krokem je výpočet minimální šířky proudově namáhaných spojů. Oteplení spoje bylo zvoleno 30 °C a průměrný proud byl zvolen 15 A. Výpočet byl proveden pomocí online kalkulatoru [18]. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 19. Tloušťka spojů je předpokládána 2 oz, což odpovídá 70 μm. Z výsledku vyplývá, že je zapotřebí dodržet minimální šířku 3,23 mm. K návrhu plošného spoje byl využit program KiCad verze 5.1.9 [19], knihovny však neobsahují DSP, DRV8305 a výkonové spínače CSD88599. Na stránkách componentsearchengine.com [17] je možné najít spoustu dalších součástek i pouzder nejen pro KiCad. Z těchto stránek byly staženy zmíněné chybějící součástky a pouzdra.

| Inputs: | | |
|-----------|----|---------|
| Current | 15 | Amps |
| Thickness | 2 | oz/ft^2 |

| Optional Inputs: | | |
|---------------------|----|-------|
| Temperature Rise | 30 | Deg C |
| Ambient Temperature | 25 | Deg C |
| Trace Length | 10 | mm |

| Results for External Layers in Air: | | |
|-------------------------------------|----------|-------|
| Required Trace Width | 3.23 | mm |
| Resistance | 0.000840 | Ohms |
| Voltage Drop | 0.0126 | Volts |
| Power Loss | 0.189 | Watts |

Obrázek 19 – kalkulace šířky spoje [18]

Silnoproudé spoje byly vytvořeny formou vylitých zón. U těch je důležité nastavit vyšší prioritu, jinak by byly překryty konečnou zónou GND. Nastavení zóny signálu MOT_A je na obrázku 20. Je také zapotřebí nastavit teplotní profil pouze na vývodové součástku (případně žádný), jinak dojde k vytvoření teplotních profilů také u SMD, což vzhledem k proudovému zatížení a odvodu tepla od spínačů není žádoucí. Zóna GND má výchozí nastavení priority 0. Na obrázku 21 je výsledná deska plošných spojů.

Vlastnosti zóny mědi

| Vrstva | Sít' |
|--|----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> F.Cu | <no net> |
| <input type="checkbox"/> B.Cu | GNDD |
| | +3V3 |
| | /SL_A |
| | /SL_B |
| | /SL_C |
| | /MOT_A |
| | /MOT_B |
| | /MOT_C |
| | VDC |
| | /VDDIO |
| | /V_A |
| | /V_B |
| | /V_C |
| | /Vdc |
| | /Fault |
| | /RESETn |

Nastavení

☐ Omezit obrys na H, V a 45 stupňů

Vyhlazení rohů: Žádné

Poloměr zaoblení: 0 mm

Priorita zóny: 3

Zobrazení obrysu: Šrafováno

Izolační mezera: 0,254 mm

Minimální šířka: 0,254 mm

Spojení plošky: Teplotní profily pouze pro PTH

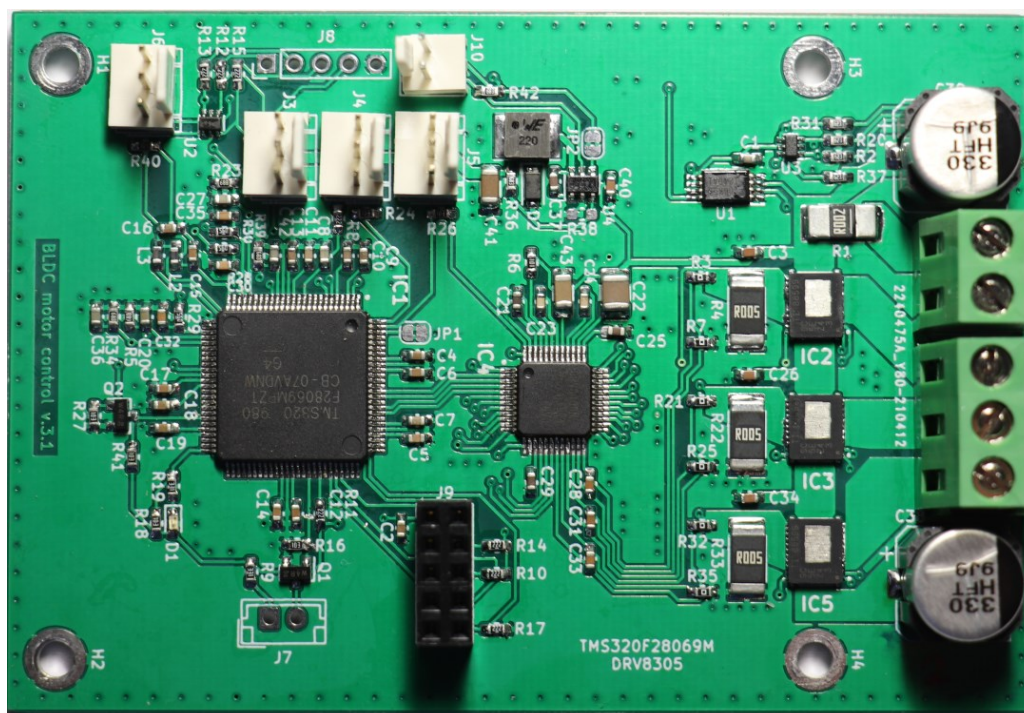
Teplotní mezera: 0,254 mm

Šířka paprsku: 0,508 mm

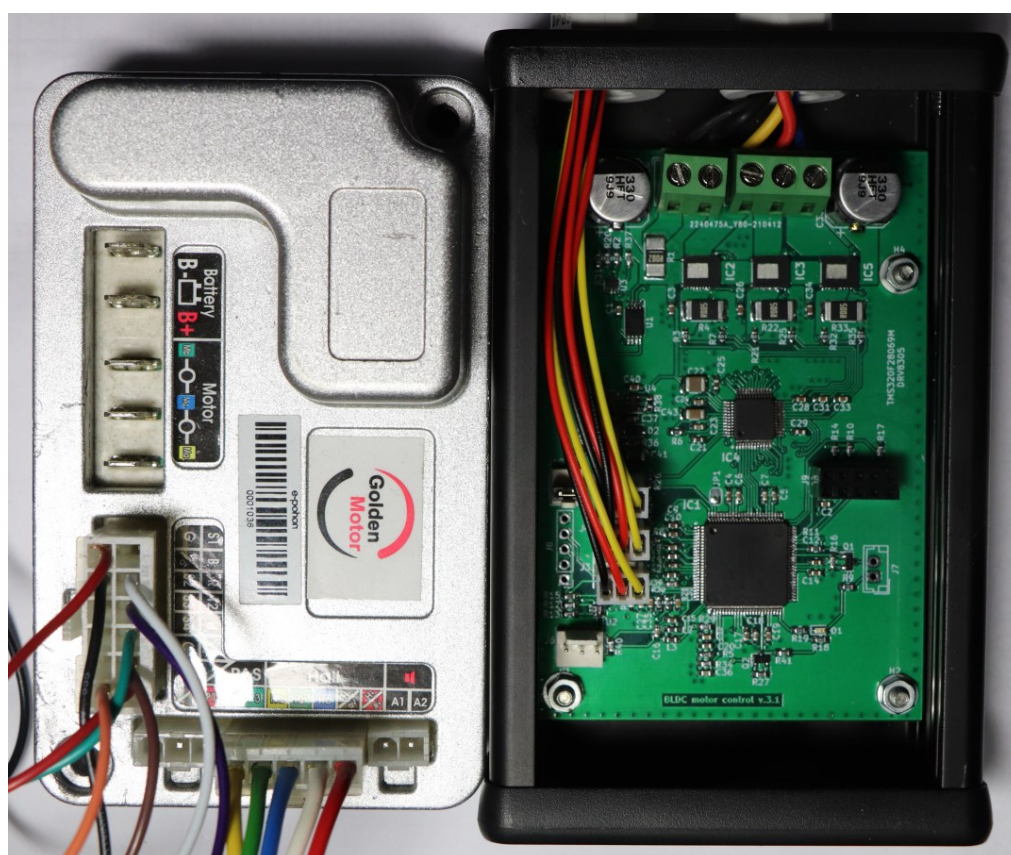
Exportovat nastavení do ostatních zón

OK Zrušit

Obrázek 20 – nastavení zón silnoproudých vedení



Obrázek 21 – foto realizované desky řízení pohonu

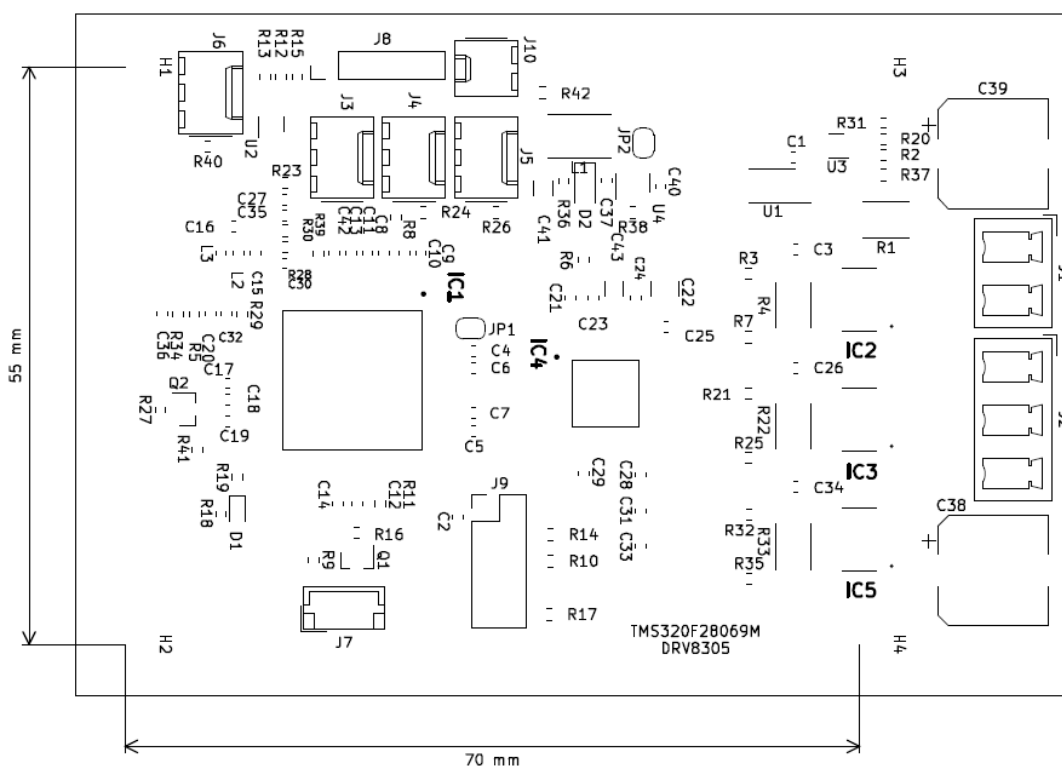


Obrázek 22 – původní řídicí jednotka (vlevo) a krabička s popisovaným pohonem bez víka

2.6 Mechanická konstrukce

Plošný spoj řízení je vestavěn do hliníkové konstrukční krabičky HAMMOND 1455J1201BK o rozměrech 120x78x27, která slouží také jako chladič. V oblasti výkonových součástek je pod plošný spoj umístěn 3 mm hliníkový plech o rozměrech 63x35 mm, který slouží jako tepelně vodivý můstek mezi deskou a stěnou krabičky. Styčné plochy jsou potřeny silikonovou vazelinou. Lze použít pastu na chladiče procesorů. Na straně plošného spoje je silikonová teplotně vodivá izolační podložka z důvodu elektrické izolace a lepších mechanických vlastností. Nepájivá maska plošného spoje se může snadno porušit případným kovovým otřepem na plechu a způsobit tak nežádoucí zkrat. Výška plechu 3 mm byla zvolena kvůli zamezení zkratu pinů konektorů zapájených do desky. Uchycení desky je provedeno čtyřmi šrouby M3x12, na straně svorkovnic je jimi současně upevněn i hliníkový plech a na straně DSP jsou využity na 3 mm zkrácené plastové distanční sloupky k získání stejné izolační mezery mezi PCB a stěnou krabičky.

Na čele krabičky jsou umístěny 2 kabelové průchodky PG-7, jedna slouží pro přívod napájení a výstup na motor, druhá je určena pro přívody od senzorů.



Obrázek 23 – kóty děr pro uchycení plošného spoje

3 Implementace algoritmu řízení momentu pohonu elektrokola

K vývoji SW je zapotřebí vývojové prostředí CCS verze 10 a vyšší (Code Composer Studio), které je dostupné zdarma po registraci na webových stránkách firmy TI [16]. Volná verze je omezená velikostí kódu, pro zadaný projekt však plně vyhoví. Dále je zapotřebí nainstalovat knihovny pro řízení motorů označovaných jako MotorWare [15]. Knihovny obsahují také vrstvu HAL (Hardware Application Layer), zajišťující obsluhu periférií (I/O, ADC, PWM, Clock a dalších) použitého DSP. Vrstva HAL ovladačů předpokládá definované oblasti v paměti pro sdílení dat mezi spodní (HAL) a vyššími vrstvami. K tomu slouží struktury popisující data uložení v definované oblasti, kdy se pak mezi funkcemi předává pouze ukazatel na oblast paměti dat. Při úpravách, kdy vyžadujeme rozšíření funkcionality ovladačů HAL, je zapotřebí také patřičně upravit i struktury s popisem těchto dat.

Po instalaci MotorWare [15] se v jeho adresáři `ti\motorware_1_01_00_18\sw\solutions` nacházejí řešené laboratorní příklady. Tyto příklady obsahují řešení různých úloh řízení motorů s využitím knihoven InstaSPIN-FOC nebo InstaSPIN-Motion. Na základě vyzkoušení funkcionality úlohy Lab05a (momentové řízení pouze s FOC) a Lab05b (rychlostní řízení s FOC) byla zvolena jako výchozí varianta Lab05c (identifikace setrvačnosti s modulem Motion). Důvodem volby byl klidnější chod při rozběhu a při nízkých otáčkách. Vybraný projekt byl, z důvodu přenositelnosti, vytvořen jako samostatný. Vyžadované knihovní funkce MotorWare byly přidány přímo k projektu, takže ve výsledku pro spuštění již není zapotřebí mít nainstalován balíček MotorWare knihoven.

Výchozí kód projektu byl rozšířen tak, aby vyhovoval potřebám projektu. Jedná se především o rozšíření počtu kanálů pro měření ADC, kde je nyní zapotřebí měřit také napětí od senzoru momentu, proud odebíraný z akumulátoru (případně dodávaný při rekuperaci). Vzhledem k tomu, že výchozím řízením v originálním projektu je rychlostní, byly přidány potřebné úpravy pro řízení momentové. Při úpravách však byla ponechána také možnost rychlostního řízení, přepínání lze provést na desce spojů pomocí pájecí spojky JP1.

3.1 Analogové vstupy

Rozšíření kanálů ADC vyžaduje příslušné úpravy ve struktuře HAL_AdcData souboru hal_obj.h. Jak je zvýrazněno v kódu níže, byly přidány proměnné control a bat_current.

Kód:

```
typedef struct _HAL_AdcData_t_
{
    MATH_vec3 I;          //!< the current values

    MATH_vec3 V;          //!< the voltage values

    _iq      dcBus;        //!< the dcBus value
    _iq      control;      //!< the speed/torque control value
    _iq      bat_current;   //!< current from battery / consumption/recuperation
} HAL_AdcData_t;
```

Dále uvedené řádky kódu již popisují přidání kódu měření analogových vstupů od senzoru a měření proudu z/do akumulátoru do funkcí HAL_readAdcData a HAL_readAdcDataWithOffsets v souboru hal.h. Hodnota ADC_SocChanNumber_A6 určuje vstupní pin ADC, ADC_SocNumber_8 pak pořadí měření v HAL. ADC_SocSampleDelay_9_cycles určuje délku vzorkování.

Kód:

```
// read the speed/torque control voltage value
value = (_iq)ADC_readResult(obj->adcHandle,ADC_ResultNumber_8);
value = _IQ12mpy(value,voltage_sf);
pAdcData->control = value;

// read the value of total current from battery
value = (_iq)ADC_readResult(obj->adcHandle,ADC_ResultNumber_9);
value = _IQ12mpy(value,current_sf);
pAdcData->bat_current = value;
```

Doplnění ve funkci HAL_setupAdcs souboru hal.c

Kód:

```
// Speed/torque control input
ADC_setSocChanNumber(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_8,ADC_SocChanNumber_A6);
ADC_setSocTrigSrc(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_8,ADC_SocTrigSrc_EPWM1_ADCSOCA);
ADC_setSocSampleDelay(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_8,ADC_SocSampleDelay_9_cycles);

// Total current input
ADC_setSocChanNumber(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_9,ADC_SocChanNumber_B7);
ADC_setSocTrigSrc(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_9,ADC_SocTrigSrc_EPWM1_ADCSOCA);
ADC_setSocSampleDelay(obj->adcHandle,ADC_SocNumber_9,ADC_SocSampleDelay_9_cycles);
```

3.2 Parametry motoru a rozsah měření napětí a proudů

V souboru user_j1.h bylo zapotřebí správně nastavit parametry napájecího napětí, rozsahu měření napětí a proudů. Výpis kódu obsahuje změny vůči originálnímu kódu.

Kód:

```
#define USER_IQ_FULL_SCALE_VOLTAGE_V      (36.0)
#define USER_ADC_FULL_SCALE_VOLTAGE_V      (44.30)
#define USER_IQ_FULL_SCALE_CURRENT_A       (24.0)
#define USER_ADC_FULL_SCALE_CURRENT_A      (47.14)
#define USER_PWM_FREQ_kHz                  (30.0)
```

Dále je třeba založit vlastní název motoru, nebo upravit některý stávající. Parametry Rs, Ls a FLUX byly zjištěny pomocí laboratorní úlohy pro identifikaci parametrů motoru. Počet pólů je 23 a vychází z počtu pólů udávaných výrobcem motoru. Některé parametry jsou ignorovány, například USER_MOTOR_ENCODER_LINES u bezsenzorového řízení není zapotřebí.

Kód:

```
#define USER_MOTOR_TYPE                    MOTOR_Type_Pm
#define USER_MOTOR_NUM_POLE_PAIRS          (23)
#define USER_MOTOR_Rr                       (NULL)
#define USER_MOTOR_Rs                       (0.1218252)
#define USER_MOTOR_Ls_d                     (0.00023495)
#define USER_MOTOR_Ls_q                     (0.00023495)
#define USER_MOTOR_RATED_FLUX               (0.03955824)
#define USER_MOTOR_MAGNETIZING_CURRENT      (NULL)
#define USER_MOTOR_RES_EST_CURRENT           (2.0)
#define USER_MOTOR_IND_EST_CURRENT           (-0.5)
#define USER_MOTOR_MAX_CURRENT               (20.0)
#define USER_MOTOR_FLUX_EST_FREQ_Hz         (20.0)
#define USER_MOTOR_ENCODER_LINES            (1000.0)
#define USER_MOTOR_MAX_SPEED_KRPM           (0.8)
#define USER_SYSTEM_INERTIA                  (0.02)
#define USER_SYSTEM_FRICTION                 (0.01)
```

3.3 Vstupy/výstupy

Je potřeba změnit nastavení módu vstupních a výstupních portů ve funkci HAL_setupGpios v souboru hal.c. Použitý interní pull-up je ještě posílen externím rezistorem.

Kód:

```
// GPIO
GPIO_setMode(obj->gpioHandle,GPIO_Number_12,GPIO_12_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setPullup(obj->gpioHandle,GPIO_Number_12,GPIO_Pullup_Enable);
GPIO_setDirection(obj->gpioHandle,GPIO_Number_12,GPIO_Direction_Input);
// S/T
GPIO_setMode(obj->gpioHandle,GPIO_Number_22,GPIO_22_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setPullup(obj->gpioHandle,GPIO_Number_22,GPIO_Pullup_Enable);
GPIO_setDirection(obj->gpioHandle,GPIO_Number_22,GPIO_Direction_Input);
// BrakeR
GPIO_setMode(obj->gpioHandle,GPIO_Number_32,GPIO_32_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setPullup(obj->gpioHandle,GPIO_Number_32,GPIO_Pullup_Enable);
GPIO_setDirection(obj->gpioHandle,GPIO_Number_32,GPIO_Direction_Input);
// BrakeF
GPIO_setMode(obj->gpioHandle,GPIO_Number_33,GPIO_33_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setPullup(obj->gpioHandle,GPIO_Number_33,GPIO_Pullup_Enable);
GPIO_setDirection(obj->gpioHandle,GPIO_Number_33,GPIO_Direction_Input);
// LED
GPIO_setMode(obj->gpioHandle,GPIO_Number_39,GPIO_39_Mode_GeneralPurpose);
GPIO_setLow(obj->gpioHandle,GPIO_Number_39);
GPIO_setDirection(obj->gpioHandle,GPIO_Number_39,GPIO_Direction_Output);
```

Dále přiřadíme pojmenování definovaným portům (hal.h.).

Kód:

```
#define SW_RUN GPIO_Number_12
#define SW_TORQUE_CONTROL GPIO_Number_22
#define SW_BRAKE_R GPIO_Number_32
#define SW_BRAKE_F GPIO_Number_33
```

3.4 Přerušení

Ve funkci mainISR v souboru main.c je přidán kód obsluhy nastavení momentu/rychlosti a také brzdícího momentu. Je také zapotřebí na základě stavu vstupu S/T blokovat volání obsluhy rychlosti v případě, že máme momentové řízení. V kódu níže je vidět, že se aplikuje offset a zisk pro hodnotu ze senzoru. Rozsah napětí z HAL je totiž pouze 0,8 – 2,6 V při napájení z 3,3V. V kódu byly použity konstanty pro offset a zisk, pro získání požadovaného rozsahu hodnoty pro řízení. Během testů bylo potřeba mít možnost plynule ovládat brzdící moment, z toho důvodu signál od brzdových senzorů způsobí negaci řídicí hodnoty momentu a tím mění brzdný moment. Volání HAL_readAdcData je původní kód, za ním následují úpravy v kódu.

Kód:

```
if((~HAL_readGpio(halHandle, (GPIO_Number_e)SW_BRAKE_F) &
0x1)||(~HAL_readGpio(halHandle, (GPIO_Number_e)SW_BRAKE_R) & 0x1))
{
    gValueSelected = _IQmpy((gAdcData.control - SPEED_OFFSET),_IQ(-1));
}else{
    gValueSelected = gAdcData.control - SPEED_OFFSET;
}
// gValueSelected = _IQmpy((gAdcData.control - SPEED_OFFSET),_IQ(-1));

if(gSpeedControl)
{
    gMotorVars.SpeedRef_krpm =gValueSelected * SPEED_GAIN;
}else{
    gMotorVars.IqRef_A = gValueSelected * SPEED_GAIN;
}

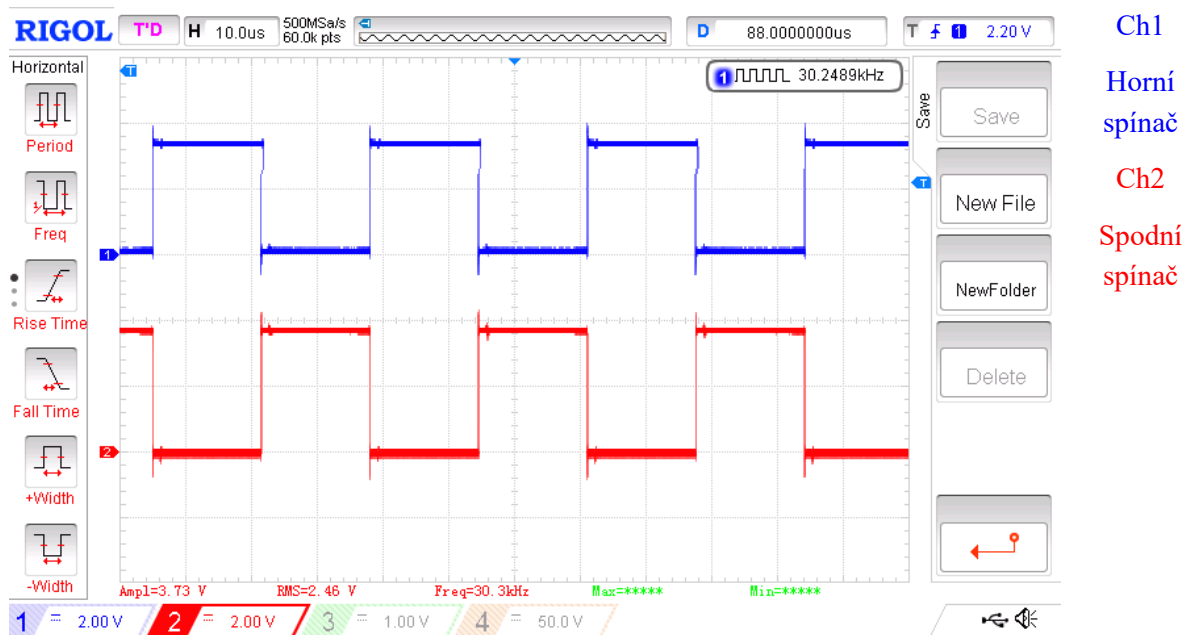
#ifdef DRV8305_SPI
if(DRV8305_isFault(halHandle->drv8305Handle))
{
    gDrvSpi8305Vars.ReadCmd = 0x01;
    HAL_readDrvData(halHandle,&gDrvSpi8305Vars);
    DRV8305_reset(halHandle->drv8305Handle);
}
#endif

if(gSpeedControl)
{
    // Run the SpinTAC Components
    if(stCnt++ >= ISR_TICKS_PER_SPINTAC_TICK) {
        ST_runVelId(stHandle, ctrlHandle);
        stCnt = 1;
    }
}
```

4 Zhodnocení parametrů realizovaného vzorku a jeho porovnání s původním řešením

4.1 Měření na zkonstruované řídicí jednotce

Na obrázku 24 jsou zobrazeny řídicí signály pro spínače můstku fáze A, a to PWM_AH a PWM_AL. Napětí fáze motoru vůči zemi má obdobný průběh. Jednotka pracuje na spínacím kmitočtu 30 kHz. Zachycené snímky obrazovky osciloskopu byly kvůli původně černému pozadí invertovány, proto barvy kanálů neodpovídají zvyklostem. Tabulky 2 a 3 zobrazují statické měření spotřeby naprázdno a při zatížení DC motorem.



Obrázek 24 – řídicí signály PWM pro jednu fázi, stav stojícího motoru

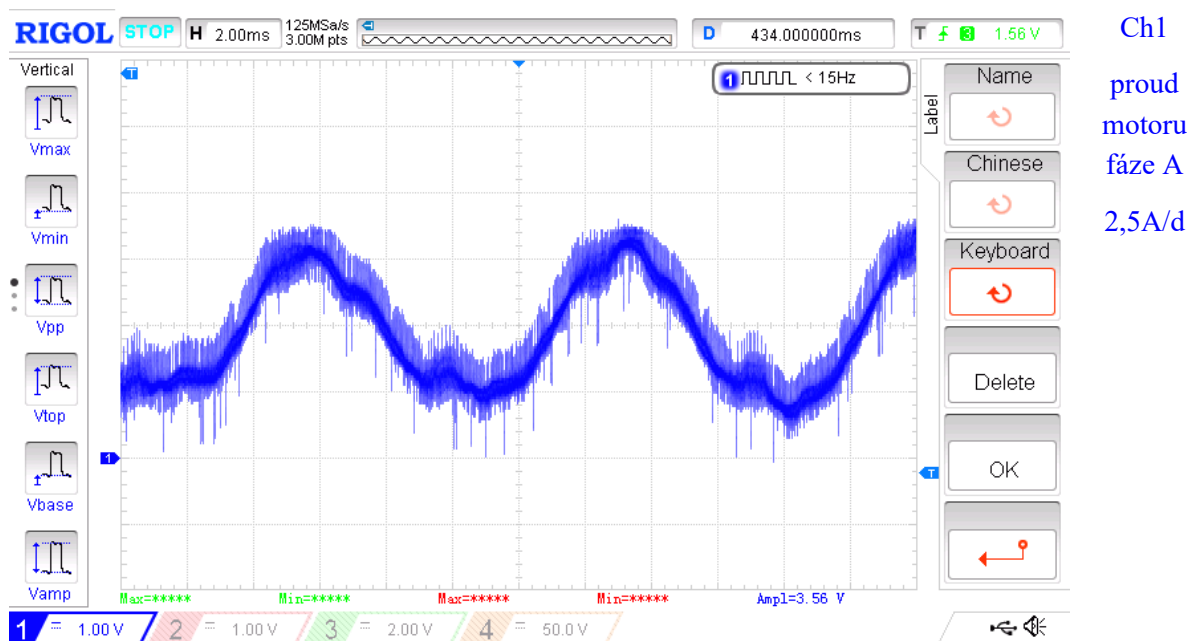
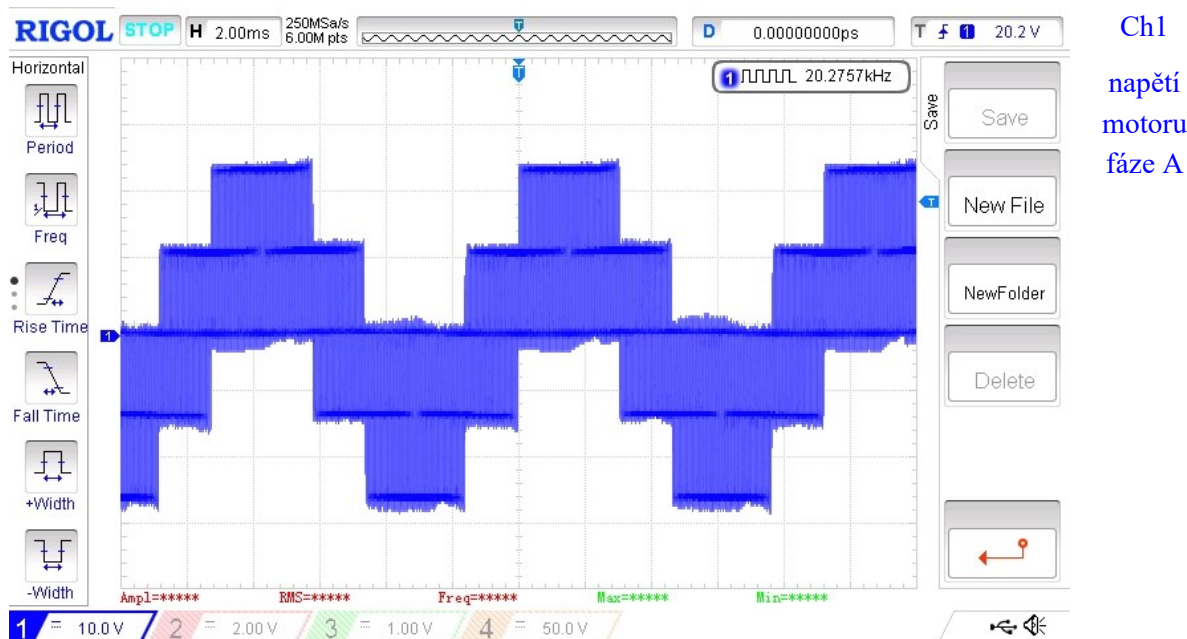
Tabulka 2 – odběr naprázdno

| otáčky (ot/sec) | proud (A) |
|-----------------|-----------|
| 0,5 | 0,15 |
| 1 | 0,29 |
| 2 | 0,84 |

Tabulka 3 – odběr se zátěží

| otáčky (ot/sec) | proud (A) |
|-----------------|-----------|
| 0,5 | 0,45 |
| 1 | 1,09 |
| 2 | 4,7 |

Napětí na motoru bylo snímáno s využitím virtuálního středu za pomoci 3 rezistorů 1 k Ω zapojených do hvězdy. Vzhledem k nedostupnosti galvanicky oddělené proudové sondy bylo měření napětí a proudu na jedné fázi motoru provedeno samostatně. Na obrázku 25 je zobrazeno napětí fáze A motoru, a na obrázku 26 je zobrazen průběh proudu fáze A. Proud byl snímán diferenciálním zesilovačem ve stejném zapojení jako je použito v popisované konstrukci pro měření proudu z baterie, měl však zisk 200. Offset proudu je v tomto případě 4,125 A.

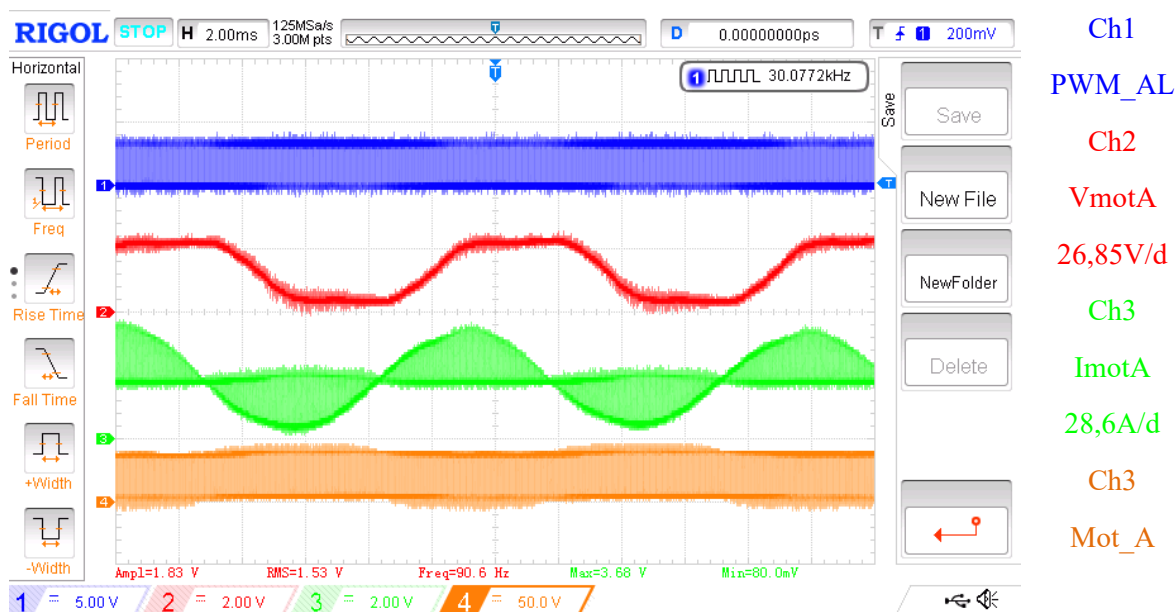


Pro zjednodušení srovnávacího měření byly následně sondy připojeny na příslušné vstupy ADC. Z tohoto důvodu se na dalších obrázcích vyskytuje již filtrované napětí fáze motoru. Průběh proudu na bočníku spodního spínače je ovlivněn spínáním tohoto tranzistoru a vzorkováním ADC. Řešení snímání proudu na bočníku vůči zemnímu potenciálu desky je konstrukčně výhodnější, je však zapotřebí synchronizovat vzorkování ADC se spínáním PWM.

Na obrázku 27 je zobrazen rozběh motoru a na obrázku 28 průběh při ustálených otáčkách motoru bez zátěže. První kanál (modrý) zobrazuje řídicí signál horního spínače PWM_AH, druhý kanál (červený) zobrazuje filtrované sdružené napětí MOT_A vůči zemnímu potenciálu, třetí kanál (zelený) zobrazuje proud spodním spínačem MOT_A a čtvrtý kanál (oranžový) zobrazuje průběh napětí na přívodu fáze motoru A vůči zemi. U měření napětí odpovídá maximální napětí 3,3 V pro ADC skutečnému napětí 44,3 V. Vzhledem k unipolárnímu napájení je díky PWM vytvořen virtuální střed, kdy nulovému napětí odpovídá šířka pulsů 50 %. Díky tomu vidíme na osciloskopu napájecí napětí se středem v polovině rozsahu ADC. Jak již bylo uvedeno v popisu jednotky, snímání proudu je posunuto do kladného rozsahu a nulový proud také odpovídá polovině napájecího napětí tj. 1,65 V. Od přepočteného proudu tak odečítáme 23,57A. Napětí a proud můžeme přepočítat následovně:

$$I = \frac{U_{div}}{A \cdot R_{SHUNT}} = \frac{2}{10 \cdot 0,007} = 28,57 \text{ A/d} \quad (5)$$

$$U = U_{div} \cdot \frac{(4,99 \text{ k}\Omega + 62 \text{ k}\Omega)}{4,99 \text{ k}\Omega} = 2 \cdot \frac{(4,99 \text{ k}\Omega + 62 \text{ k}\Omega)}{4,99 \text{ k}\Omega} = 26,85 \text{ V/d} \quad (6)$$

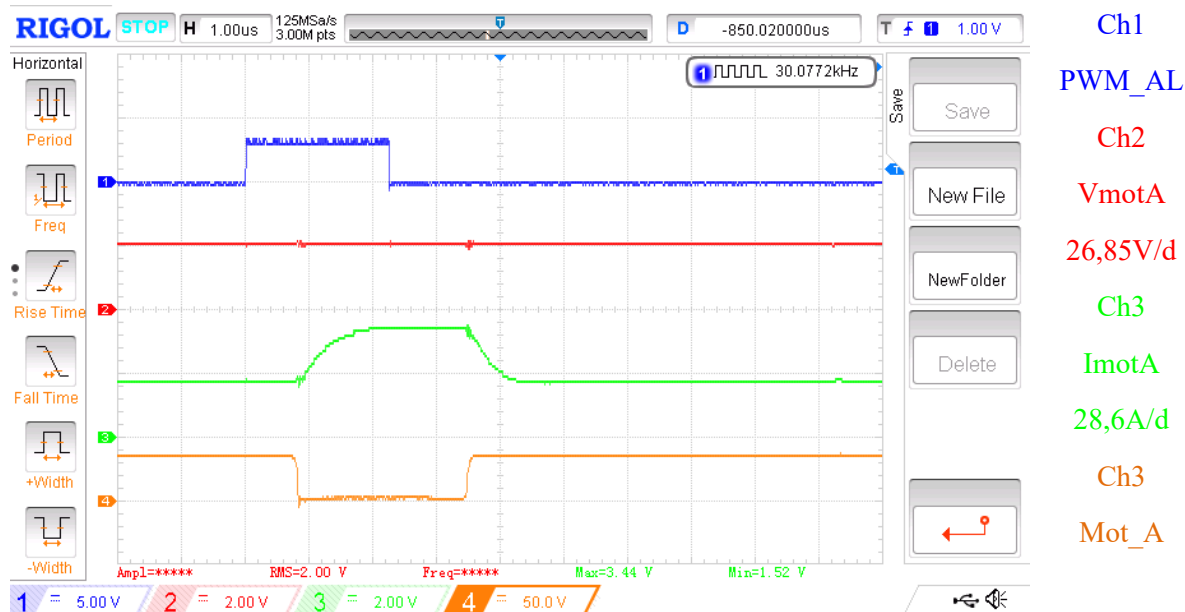


Obrázek 27 – měření při rozběhu motoru, napětí a proud na vstupech ADC

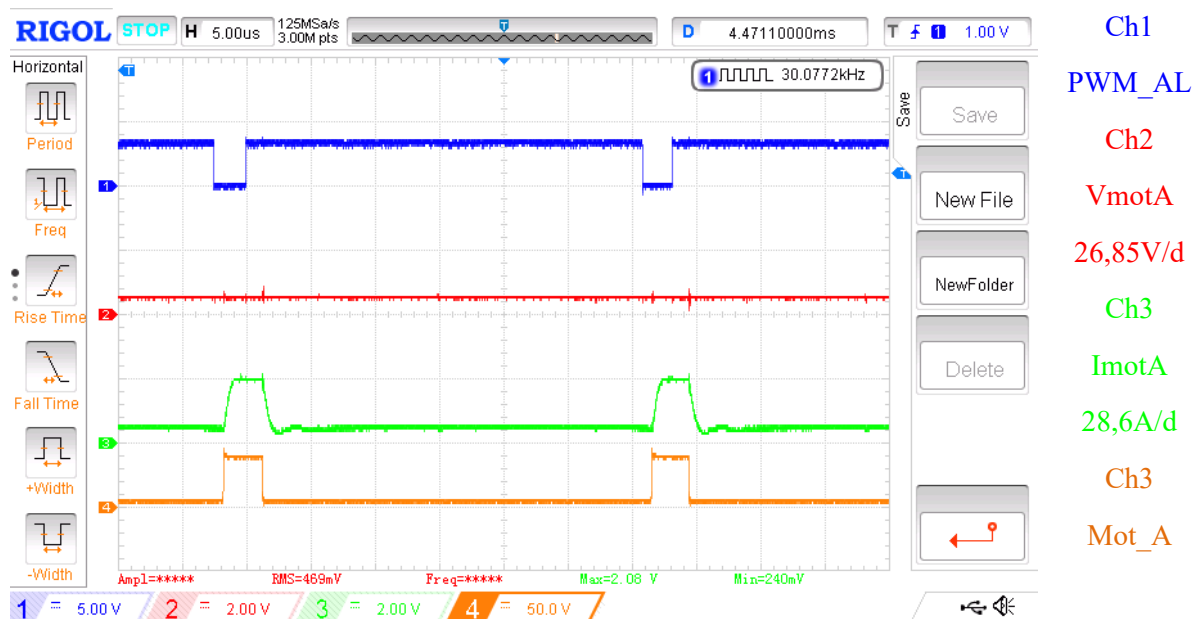
U průběhu proudu lze vidět modulaci díky spínání PWM. Naopak není vidět modulace PWM u měřeného napětí, která chybí díky použitému kondenzátoru 100 nF v obvodu děliče. Na obrázku 28 a 29 je zvětšení zachyceného průběhu z obrázku 27. Obrázek 28 zachycuje oblast kladného průběhu proudu a je vidět, že v této části je zapotřebí měřit proud v době sepnutí spodního tranzistoru v můstku. Na obrázku 29 je oblast záporného průběhu proudu a proud teče zpětnou diodou spodního tranzistoru, zatímco během jeho sepnutí se vrací k nule.

Správným časováním vzorkování ADC lze zajistit pro vnitřní výpočty správné hodnoty napětí a proudů. Tímto se výrazně zjednoduší analogová část zpracování signálů. Tento koncept vychází

z řešení vývojových modulů firmy TI a v popisované konstrukci bylo toto řešení převzato včetně základního software. Software uvnitř procesoru výpočtem zajistí potřebné hodnoty pro řízení motoru.



Obrázek 28 – průběhy během kladného proudu na bočníku spodního spínače



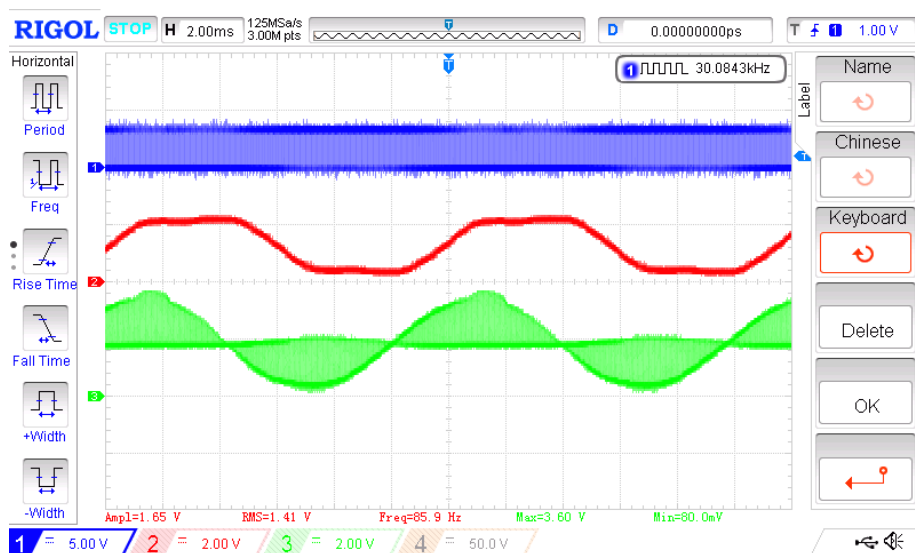
Obrázek 29 – průběhy během záporného proudu na bočníku spodního spínače

Na obrázcích 28 a 29 lze také vidět časové zpoždění mezi signálem PWM z procesoru a spínáním tranzistoru. Toto zpoždění, které je přibližně 900 ns, způsobuje řídicí obvod DRV8305 a je nastavitelné v osmi krocích od 35 ns do 5280 ns. Zpoždění také zvětšuje samotný tranzistor.

Následující obrázek 30 pak ukazuje průběhy, kdy je motor zatížen tak, že celkový odebíraný proud z akumulátoru je 10 A.

Obrázek 31 ukazuje průběhy při rozjezdu pohonu při zátěži z nulových otáček. Zelený průběh je napětí ze senzoru požadovaného momentu, červený průběh I_{bat} je proud baterie, který je přiváděn na ADC, je proto posunut o offset 1,65 V s přepočtem podle (7). Offset je v tomto případě 41,25 A.

$$I = \frac{U_{div}}{A \cdot R_{SHUNT}} = \frac{1}{20 \cdot 0,002} = 25 A/d \quad (7)$$



Ch1

PWM

Ch2

VmotA

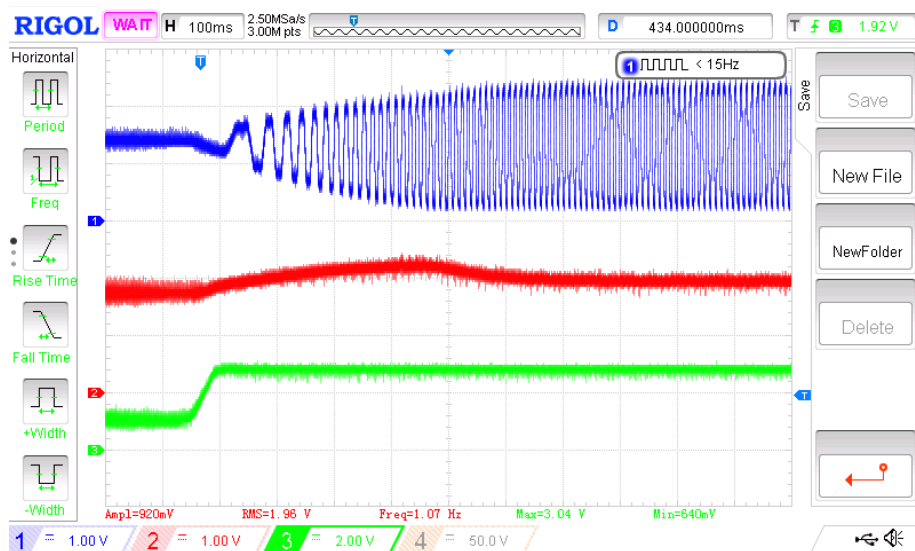
26,85V/d

Ch3

ImotA

28,6A/d

Obrázek 30 – průběhy při zátěži motoru, napětí a proud na vstupech ADC



Ch1

VmotA

13,42V/d

Ch2

Ibat

25A/d

Ch3

Vcontrol

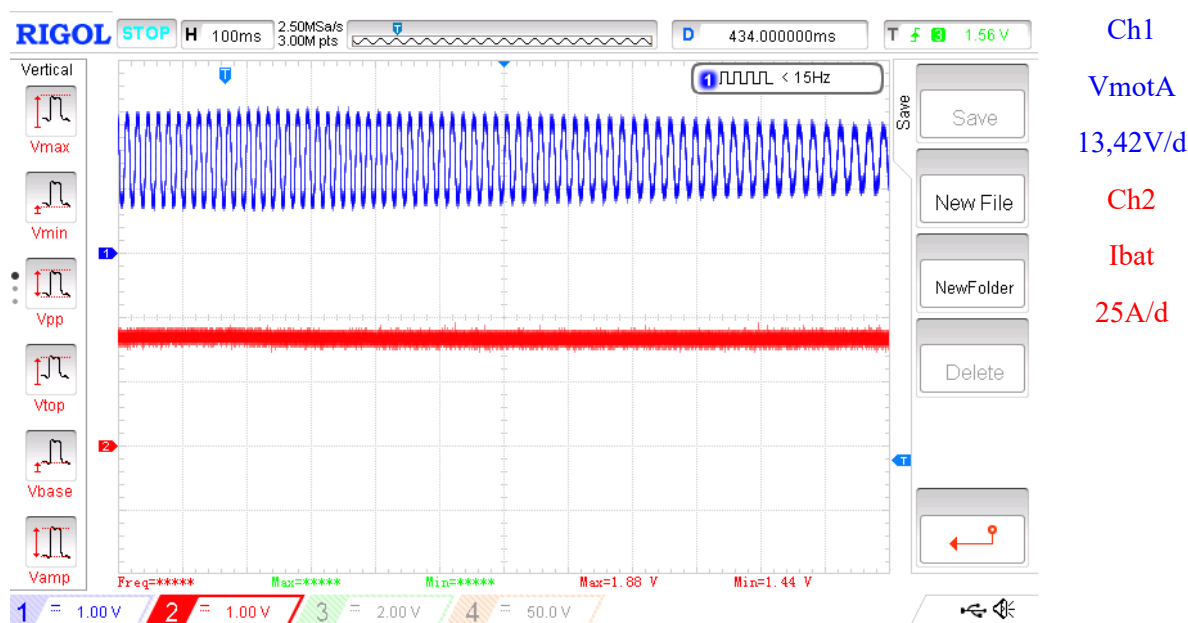
Obrázek 31 – rozběh z nulových otáček do zátěže

4.2 Měření při rekuperaci

Dalším měřením byl mód, kdy do regulátoru je dán požadavek na záporný proud a tím začne motor brzdit při současné rekuperaci energie zpět do akumulátoru. Průběh je na obrázku 32. Měřen byl průběh napětí na fázi A motoru vůči zemi a proud tekoucí z/do akumulátoru, který je snímán bočником a zpracován diferenciálním zesilovačem. Jedná se tak o posunutou hodnotu, kdy nulovému proudu odpovídá měřené napětí 1,65 V. Offset proudu je tedy 41,25 A, který musíme odečíst v případě odečtu hodnoty z osciloskopu. Při využití měření hodnot, kdy je změřená minimální hodnota na osciloskopu 1,44 V, pak odpovídající proud je

$$I = \frac{U - \frac{U_{REF}}{2}}{A \cdot R_{SHUNT}} = \frac{1,44 - 1,65}{20 \cdot 0,002} = -5,25 \text{ A} \quad (7)$$

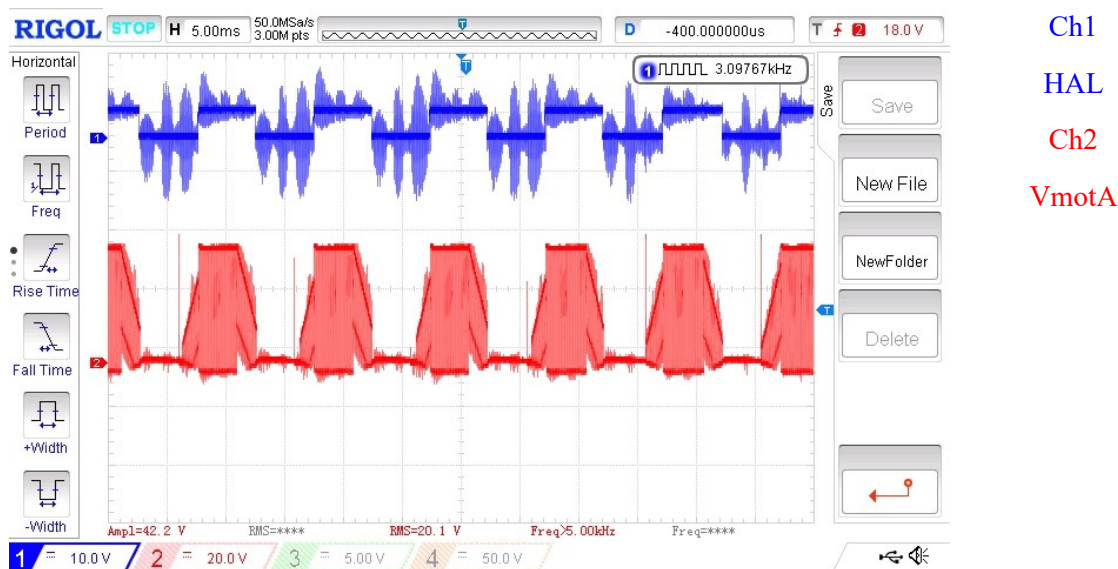
Napětí na akumulátoru stoupl na 40,3 V. Rekuperace je tedy funkční, jen v případě potřeby je možné do SW přidat současnou kontrolu napětí baterie, aby nedošlo k přebíjení. V praktickém provozu je však šance na přebíjení malá, protože bude spíše převažovat vybíjení při aktivním používání pohonu. Ochranu proti přebíjení lze také integrovat přímo do balanceru akumulátoru.



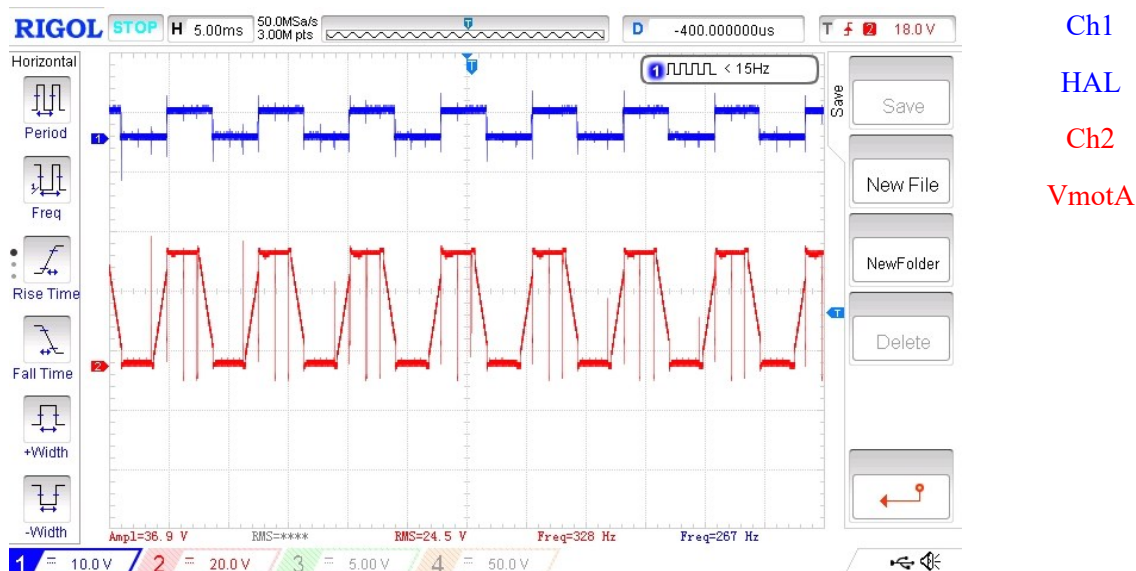
Obrázek 32 – průběh napětí a proudu při rekuperaci

4.3 Měření na původní řídící jednotce

Původní řídící jednotka firmy Goldem-Motor používá spínací kmitočet PWM 10 kHz. Pro srovnání byly změřeny pouze průběhy na jedné fázi senzoru HAL a odpovídající fázi motoru (A). Jak je vidět na obrázku 33, jedná se o lichoběžníkové řízení. Rušení této jednotky je tak velké, že se indukují nejen do přívodů k osciloskopu, ale také do vlastního signálu ze senzoru HAL, což je i slyšet na zvuku, který motor produkuje. Otáčky nebyly maximální, co jednotka umožňuje. V případě maximálních otáček již jednotka přestala budit motor pomocí PWM, což je vidět na obrázku 34.



Obrázek 33 – průběhy na senzoru HAL a odpovídající fázi motoru původní jednotky



Obrázek 34 – průběhy při maximálních otáčkách u původní jednotky

5 Závěr

Důvodem ke vzniku popisované řídicí jednotky byla snaha o umožnění rekuperace energie z motoru zpět do akumulátoru během brždění. Vzhledem k malým zkušenostem s technikou DSP byla na počátku snaha využít existující vývojové moduly a po získání dalších zkušeností vytvořit postupně vlastní řešení. To bylo důvodem, proč vznikla po prvních testech modulů od firmy TI vlastní řídicí jednotka a teprve poté bylo navrženo jednodeskové řešení. Přesto, že byl při tvorbě SW využit příklad řešené laboratorní úlohy od TI, znamenalo nutnost nastudovat nejen vrstvy HAL, ale také periferií DSP.

Vývojový prototyp, kde byl využit výkonový modul od firmy TI, byl přepracován do jednodeskové varianty především z důvodu horšího odvodu tepla z výkonových tranzistorů a řídicího obvodu. Chlazení finální desky lze doplnit o odvod tepla z horních chladících plošek tranzistorů, je však nutné použít silikonové nebo slídové podložky vzhledem k potenciálu na těchto ploškách. Během testování se ukázalo aktuální řešení chlazení jako vyhovující, nejednalo se však o dlouhodobé testy s plnou zátěží.

Navržená jednotka řízení byla prakticky vyzkoušena a měřena na přípravku s DC motorem, kde bylo měřeno chování BLDC v motorickém i generátorickém režimu. Přestavba kola s touto jednotkou je možná po splnění legislativních podmínek k provozu. To znamená například implementaci omezení momentu s ohledem na rychlost pohybu kola.

Rekuperace byla vyzkoušena ve spojení s olověnými akumulátory. Dostupné sady akumulátorů pro elektrokola mají externí nabíjení přes nabíjecí obvod a balancer a až o několik voltů vyšší nabíjecí napětí. Další nevýhodou externího nabíjení akumulátoru je omezený maximální proud. Řešením může být je zhotovení vlastního nabíječe a balanceru a zakoupení akumulátoru bez interního nabíjecího modulu.

Použitá literatura

- [1] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0
- [2] CHANG-LIANG, Xia. *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*., Wiley; 1st edition, 2012. ISBN 978-1118188330.
- [3] HUGHES, Austin and Bill DRURY. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Newnes; 5th edition, 2019. ISBN 978-0081026151.
- [4] HRUBÍŠEK, Ivo. *Elektrokola: nová dimenze cyklistiky*. Plzeň: Cykloknihy, 2011. ISBN 978-80-87193-18-1.
- [5] KESTER, Walt . *Mixed signal and DSP design techniques*. Analog Devices, Inc. 2000. ISBN 0-916550-23-0.
- [6] Texas Instruments, *Datasheet DRV8306*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/drv8306> [cit. 2021-04-03]
- [7] Texas Instruments, *C2000 Piccolo MCU F28069M LaunchPad™ development kit*. Online, <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28069M>, [cit. 2021-04-03]
- [8] Texas Instruments, *DRV8305N 3-Phase Motor Drive BoosterPack Evaluation Module*. Online, <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8305EVM>, [cit. 2021-04-03]
- [9] Texas Instruments, *Sensorless-FOC With Flux-Weakening and MTPA for IPMSM Motor Drives*. Online, <https://www.ti.com/lit/pdf/SPRACF3>, [cit. 2021-04-03]
- [10] Texas Instruments, *Datasheet TMS320F28069*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/TMS320F28069M>, [cit. 2021-04-03]
- [11] Texas Instruments, *Datasheet DRV8305*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/DRV8305>, [cit. 2021-04-03]
- [12] Texas Instruments, *Datasheet INA240*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/INA240> , [cit. 2021-04-03]
- [13] Texas Instruments, *Datasheet LMR16006*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/lmr16006>, [cit. 2021-04-03]
- [14] ON Semiconductor, *Datasheet NUP4202*. Online, https://assets.nexperia.com/documents/datasheet/74HC_HCT4053.pdf , [cit. 2021-04-03]
- [15] Texas Instruments, *Motorware Software*, Online, <https://www.ti.com/motorware> , [cit. 2021-04-03]
- [16] Texas Instruments, *Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE)*, Online, <https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO> , [cit. 2021-04-03]

- [17] SamacSys Ltd, *Electronic Component Search Engine*, Online, <https://componentsearchengine.com> , [cit. 2021-04-03]
- [18] Advanced Circuits, *PCB Trace Width Calculator*, Online, <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html> , [cit. 2021-04-03]
- [19] KiCad, *KiCad EDA*, Online, <https://kicad.org/download> , [cit. 2021-04-03]
- [20] S-KU63 e-bike motor controller, Online, <https://www.avdweb.nl/solar-bike/electronics/ku63-motor-controller> , [cit. 2021-04-16]
- [21] Texas Instruments, *Datasheet CSD88599*. Online, <https://www.ti.com/lit/gpn/CSD88599Q5DC> , [cit. 2021-04-16]

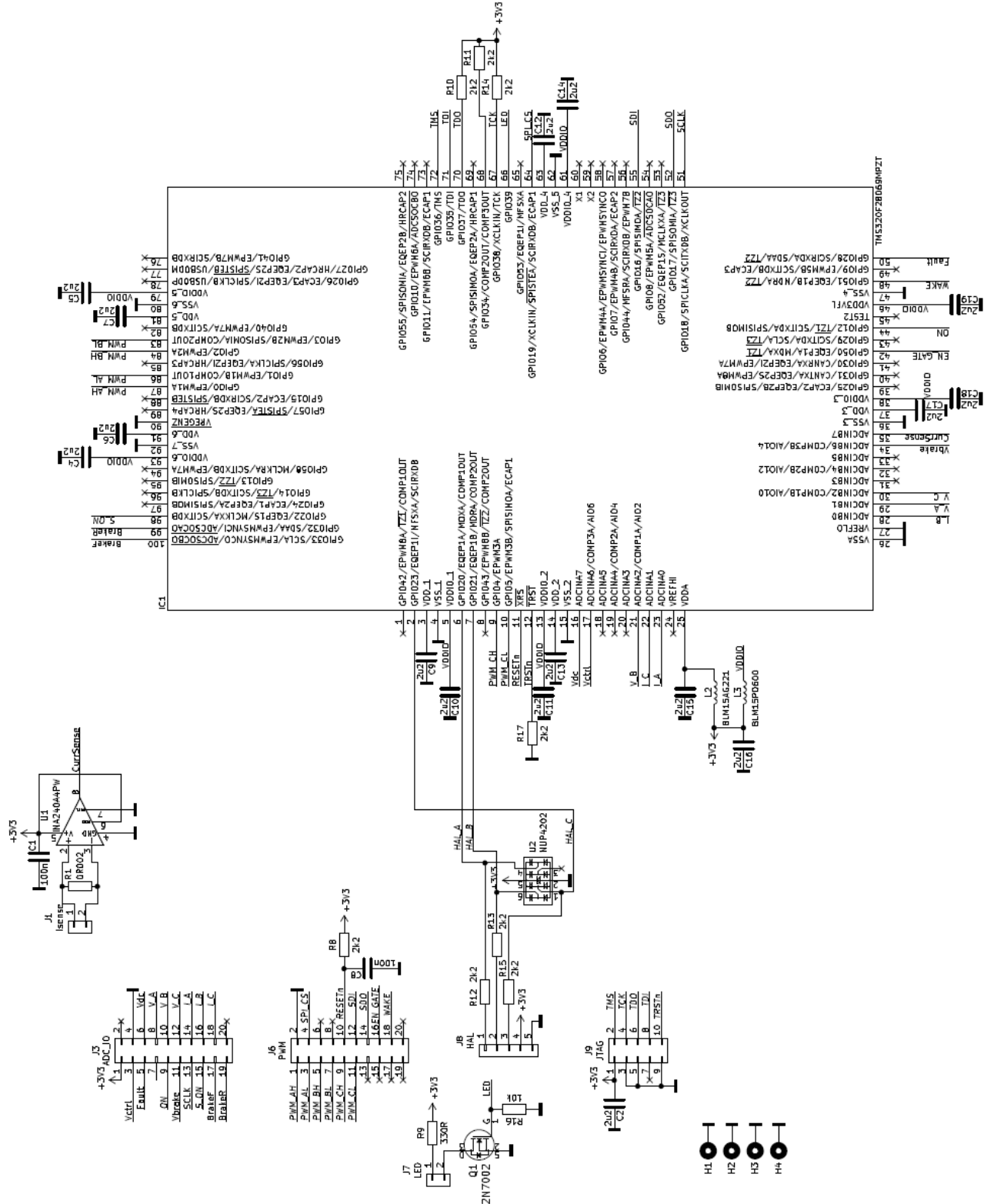
Seznam příloh

| | | |
|---|--|-----|
| A | Obsah archivu ZIP..... | I |
| B | Schéma zapojení prototypové desky..... | II |
| C | Schéma zapojení finální desky..... | III |
| D | Předlohy plošných spojů prototypu..... | IV |
| E | Osazovací plán prototypové desky..... | IV |
| F | Předlohy plošných spojů finální desky..... | V |
| G | Osazovací plán finální desky..... | VI |
| H | Seznam součástek finální desky..... | VII |

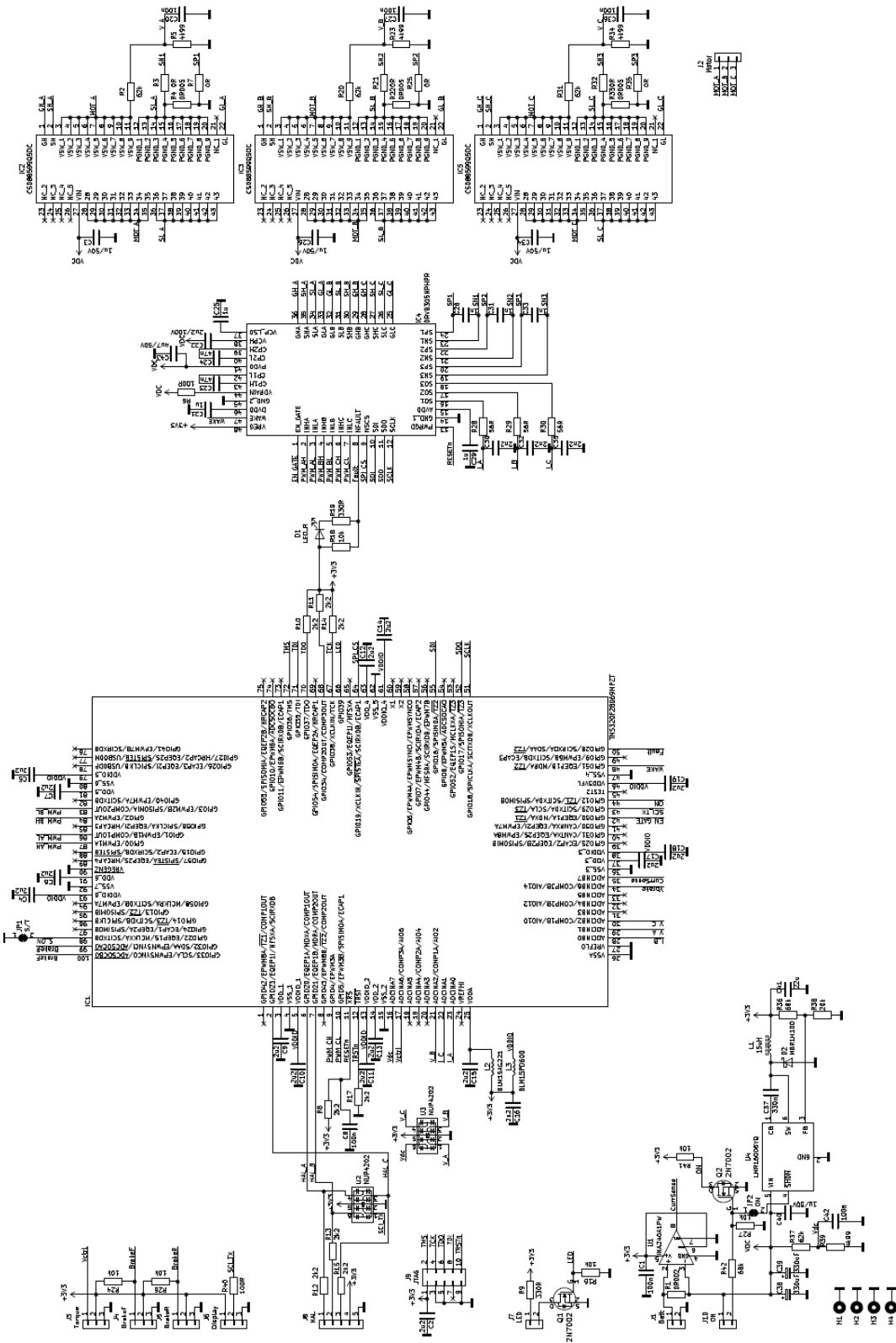
A. Obsah archivu ZIP

- bakalářská práce
- projekty plošných spojů KiCad
- projekt SW řízení BLDC motoru

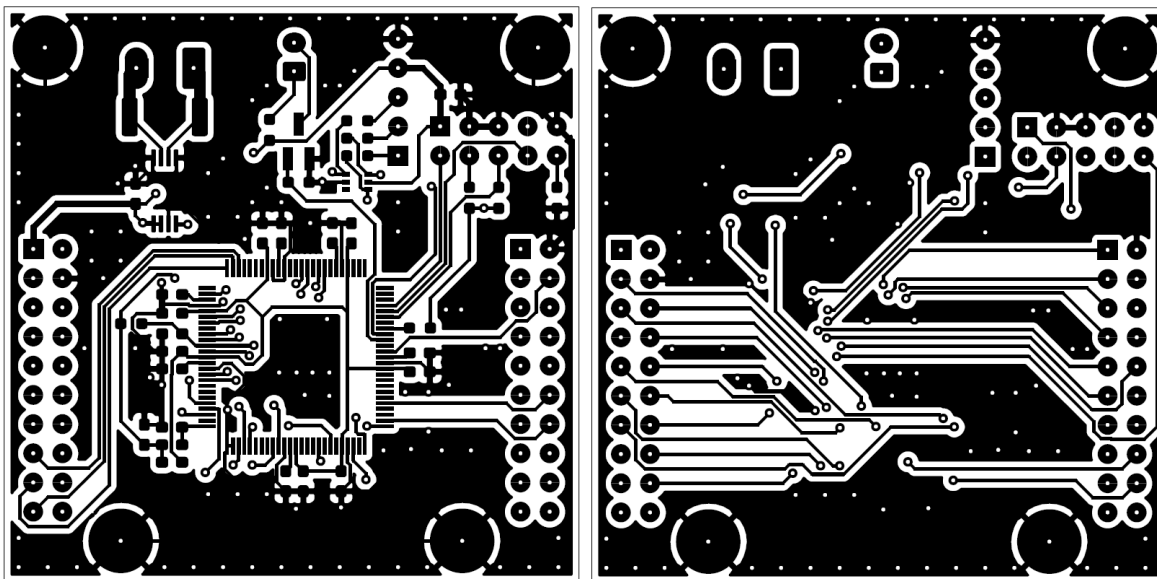
B. Schéma zapojení prototypové desky



C. Schéma zapojení finální desky

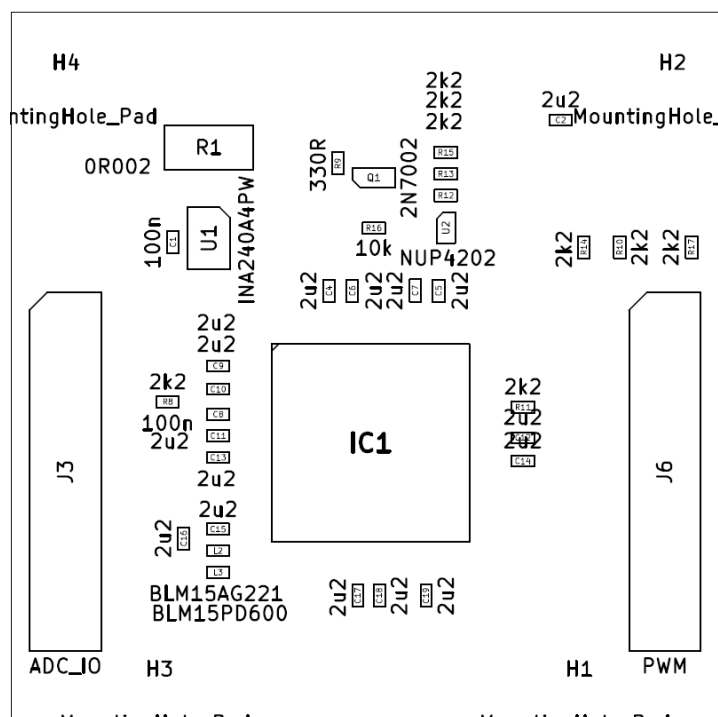


D. Předlohy plošných spojů prototypu



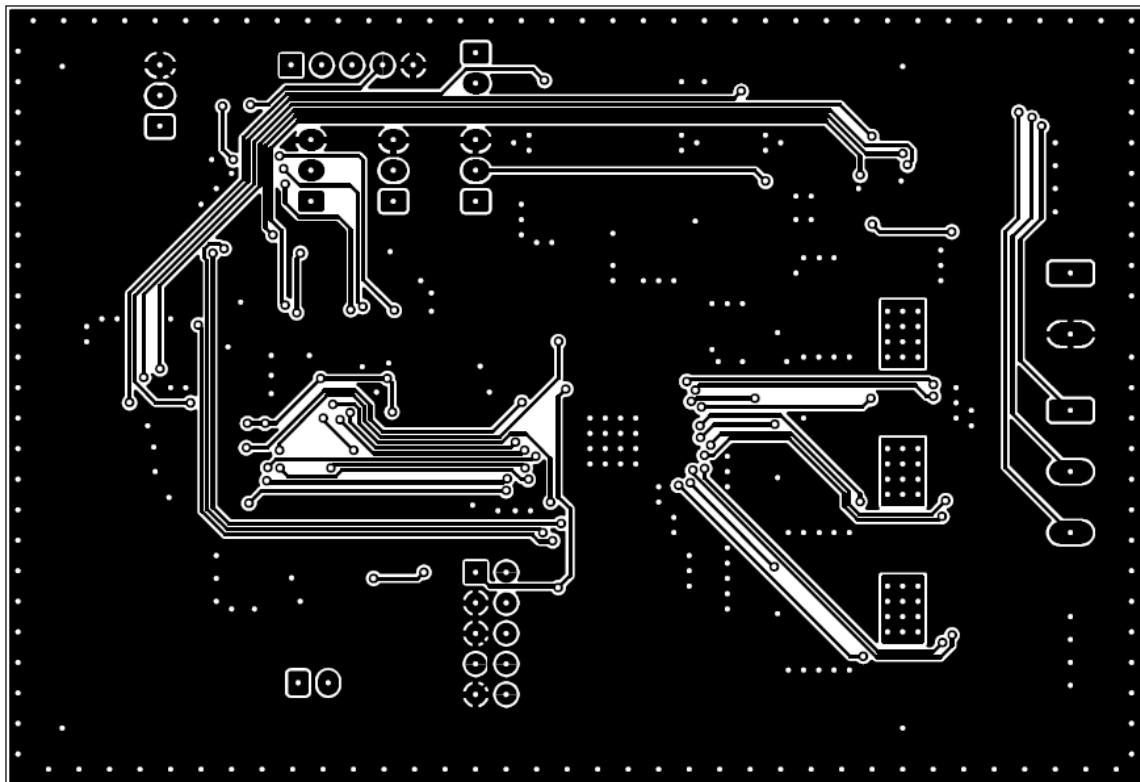
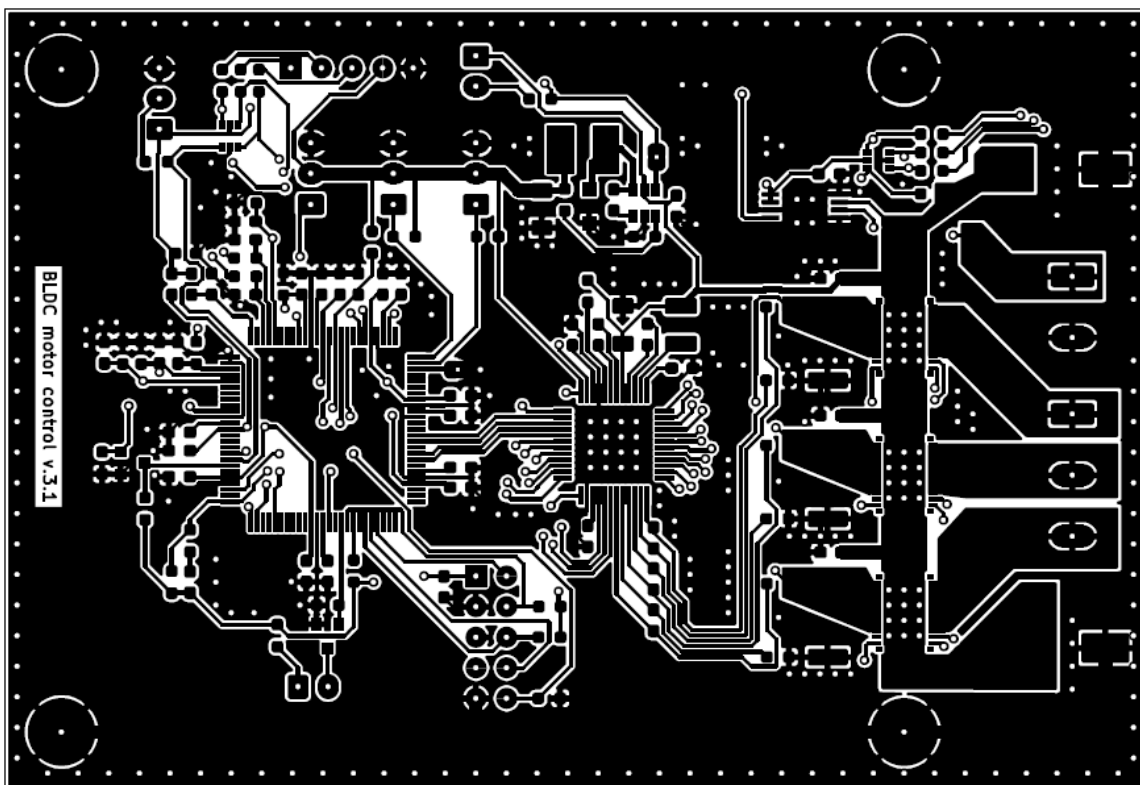
Prototypová deska DSP - TOP a BOT vrstva

E. Osazovací plán prototypové desky

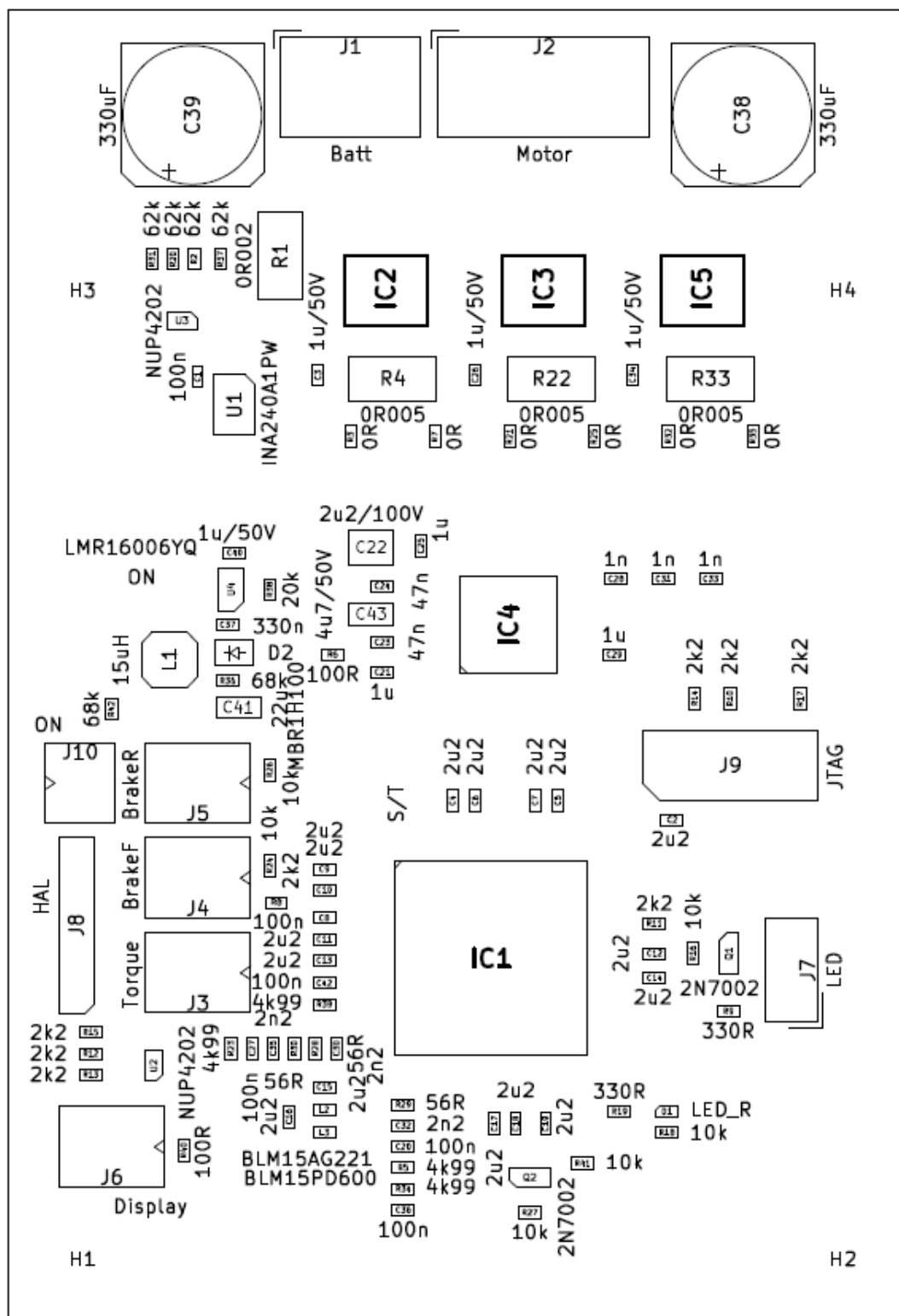


Osazovací plán – strana TOP

F. Předlohy plošných spojů finální desky



G. Osazovací plán finální desky



Osazovací plán – strana TOP

H. Seznam součástek finální desky

| Reference(s) | Value | Footprint |
|--|------------------|--|
| C1, C8, C20, C27, C36, C42 | 100n | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C2, C4, C5, C6, C7, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19 | 2u2 | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C3, C26, C34, C40 | 1u/50V | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C21, C25, C29 | 1u | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C22 | 2u2/100V | Capacitor SMD:C 1210 3225Metric Pad1.33x2.70mm HandSolder |
| C23, C24 | 47n | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C28, C31, C33 | 1n | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C30, C32, C35 | 2n2 | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C37 | 330n | Capacitor SMD:C 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| C38, C39 | 330uF | Capacitor SMD:CP Elec 10x10 |
| C41 | 22u | Capacitor SMD:C 1206 3216Metric Pad1.30x1.75mm HandSolder |
| C43 | 4u7/50V | Capacitor SMD:C 1206 3216Metric Pad1.33x1.80mm HandSolder |
| D1 | LED_R | LED SMD:LED 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| D2 | MBR1H100 | Diode SMD:D SOD-123F |
| H1, H2, H3, H4 | MountingHole_Pad | MountingHole:MountingHole 3.2mm M3 DIN965 Pad_TopBottom |
| IC1 | TMS320F28069MPZT | TMS320:QFP50P1600X1600X160-100N |
| IC2, IC3, IC5 | CSD88599Q5DC | CSD88599:CSD88599Q5DC |
| IC4 | DRV8305NPHPR | DRV8305:QFP50P900X900X120-48N |
| J1 | Batt | Connector_Phoenix_MC_HighVoltage:PhoenixContact_MCV_1,5_2-G-5.08 1x02 P5.08mm Vertical |
| J2 | Motor | Connector_Phoenix_MC_HighVoltage:PhoenixContact_MCV_1,5_3-G-5.08 1x03 P5.08mm Vertical |
| J3 | Torque | Connector_Molex:Molex KK-254 AE-6410-03A 1x03 P2.54mm Vertical |
| J4 | BrakeF | Connector_Molex:Molex KK-254 AE-6410-03A 1x03 P2.54mm Vertical |
| J5 | BrakeR | Connector_Molex:Molex KK-254 AE-6410-03A 1x03 P2.54mm Vertical |
| J6 | Display | Connector_Molex:Molex KK-254 AE-6410-03A 1x03 P2.54mm Vertical |
| J7 | LED | Connector_JST:JST EH B2B-EH-A 1x02 P2.50mm Vertical |
| J8 | HAL | Connector_PinHeader 2.54mm:PinHeader 1x05 P2.54mm Vertical |
| J9 | JTAG | Connector_PinHeader 2.54mm:PinHeader 2x05 P2.54mm Vertical |
| J10 | ON | Connector_Molex:Molex KK-254 AE-6410-02A 1x02 P2.54mm Vertical |
| JP1 | S/T | Jumper:SolderJumper-2 P1.3mm Bridged2Bar RoundedPad1.0x1.5mm |
| JP2 | ON | Jumper:SolderJumper-2 P1.3mm Bridged2Bar RoundedPad1.0x1.5mm |
| L1 | 15uH | Inductor SMD:L Taiyo-Yuden NR-40xx HandSoldering |
| L2 | BLM18AG221 | Inductor SMD:L 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| L3 | BLM18PD600 | Inductor SMD:L 0603 1608Metric Pad1.05x0.95mm HandSolder |
| Q1, Q2 | 2N7002 | Package_TO SOT SMD:SOT-23 |
| R1 | 0R002 | Resistor SMD:R 2512 6332Metric Pad1.40x3.35mm HandSolder |
| R2, R20, R31, R37 | 62k | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R3, R7, R21, R25, R32, R35 | 0R | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R4, R22, R33 | 0R005 | Resistor SMD:R 2512 6332Metric Pad1.40x3.35mm HandSolder |
| R5, R23, R34, R39 | 4k99 | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R6, R40 | 100R | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R8, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R17 | 2k2 | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R9, R19 | 330R | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R16, R18, R24, R26, R27, R41 | 10k | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R28, R29, R30 | 56R | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |

| | | |
|-------------------|-------------|--|
| R36, R42 | 68k | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| R38 | 20k | Resistor SMD:R 0603 1608Metric Pad0.98x0.95mm HandSolder |
| U1 | INA240A1PW | Package SO:TSSOP-8 4.4x3mm P0.65mm |
| U2, U3 | NUP4202 | Package TO SOT SMD:SOT-363 SC-70-6 |
| U4 | LMR16006YQ | Package TO SOT SMD:SOT-23-6 |
| Krabička | 1455J1201BK | Hammond - www.soselectronic.cz |
| Konektory senzorů | RC konektor | JST konektor 2.54 SM 3Pin Rozteč: 2,54 mm Počet pinů: 3 www.drateg.cz |